

УДК 524.7-77

## GIGAHERTZ-PEAKED SPECTRUM (GPS) ГАЛАКТИКИ И КВАЗАРЫ

© 2013 М. Г. Мингалиев<sup>1,2\*</sup>, Ю. В. Сотникова<sup>1\*\*</sup>,  
Т. В. Муфхаров<sup>1\*\*\*</sup>, А. К. Эркенов<sup>1\*\*\*\*</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

Поступила в редакцию 22 мая 2013 года; принята в печать 18 июня 2013 года

В работе представлен комплексный анализ континуальных радиоспектров выборки Gigahertz-Peaked Spectrum (GPS) источников. Источники отобраны из полной по плотности потока выборки ( $S_\nu \geq 200$  мЯн на частоте 4.8 или 5 ГГц) с использованием многочастотных измерений на радиотелескопе РАТАН-600 и системы поддержки астрофизических каталогов CATS. Среди них обнаружено незначительное количество (1–2%) “классических” GPS-объектов, что значительно меньше ожидаемых 10%. Выявлено, что GPS-галактики имеют наиболее узкие и крутые радиоспектры, чем квазары. Наблюдается, что низкочастотная часть спектра становится круче с увеличением красного смещения  $z$ . Галактики и квазары на одинаковых  $z$  имеют сравнимые угловые размеры, при этом их светимости могут на порядок отличаться. Наблюдается дефицит объектов на больших красных смещениях с низкими пиковыми частотами (несколько ГГц). Численность GPS-галактик резко падает с ростом красного смещения, основная их часть обнаружена на  $z$  от 0.01 до 1.81. GPS-квазары локализованы на больших красных смещениях — от 0.11 до 3.99. Выборка на четверть состоит из блазаров, спектр которых может временно иметь выпуклую форму в момент активности.

Ключевые слова: галактики: активные—радиоконтинуум: галактики

### 1. ВВЕДЕНИЕ

GPS-галактики и квазары (Gigahertz Peaked-Spectrum) — источники мощного радиоизлучения, имеющие выпуклую форму радиоспектра. Максимум спектра приходится на диапазон от 0.5 до нескольких десятков ГГц (в системе отсчета наблюдателя) [1–4]. GPS-объекты характеризуются малыми размерами (менее 1 крс) и низкой амплитудой переменности. Из-за малых угловых размеров даже в наблюдениях на радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами структура таких источников разрешается частично. Наиболее подробно свойства GPS-объектов раскрыты в работах [3, 4]. Большинство представлений о GPS-объектах получены статистически. Часто выборки включают квазары, временно имеющие радиоспектр с максимумом [5, 6] (далее FSRQ — Flat Spectrum Radio Quasars). На полученные к настоящему времени выводы влияют эффекты селекции из-за естественных ограничений на расширение одновремен-

но и выборок, и частотного интервала. Исследование природы GPS-источников осложняется тем, что не существует однородных выборок, полученных в широком частотном диапазоне и позволяющих определить истинные их свойства.

GPS-галактики обнаруживаются чаще на малых красных смещениях ( $0.1 \leq z \leq 1$ ), и они менее переменны, чем GPS-квазары [7–9]. Кроме того, они имеют пики на меньших частотах [9] и чаще имеют симметричную структуру, по данным наблюдений на VLBI. Квазары этого типа обычно имеют сложную структуру или структуру типа ядро-джет [10, 11].

В настоящее время более распространена модель [3, 12–15], связывающая малые линейные размеры GPS-галактик с молодым возрастом. Предполагается, что они являются предшественниками протяженных радиоисточников. Это подтверждается кинематическими и спектральными исследованиями, которые указывают на возраст объектов порядка  $10^3$ – $10^5$  лет. По другому сценарию малые линейные размеры GPS-галактик объясняются наличием плотной окружающей среды [3, 16]: такие источники не молоды, но остаются малыми по размеру из-за внешнего давления,

\*E-mail: marat@sao.ru

\*\*E-mail: sjv@sao.ru

\*\*\*E-mail: timmy23@mail.ru

\*\*\*\*E-mail: artur@sao.ru

\*\*\*\*\*E-mail: nemiroff@sao.ru

препятствующего их расширению. Малые линейные размеры GPS-квazarов иногда объясняются эффектами проекции [17].

В последние годы широко используются результаты одновременных измерений во многих диапазонах электромагнитного спектра. В результате появляются новые методы и подходы к исследованиям AGN (активные ядра галактик). Bai и Lee [18] на основе рентгеновских измерений предположили, что GPS-квazarы — это блазары, окруженные плотной газопылевой средой. Поэтому, несмотря на близкое по лучу зрения расположение джета, мы не наблюдаем для них свойств блазаров (плоский радиоспектр, переменное радиоизлучение до десятков процентов). Природа GPS-квazarов до конца непонятна. Большинство выводов и предположений, как правило, были основаны на малых выборках, на подробных исследованиях нескольких объектов или на выборках, содержащих смешанные типы объектов из-за ошибочной классификации.

При исследованиях GPS-объектов обычно анализируются следующие параметры их радиоспектров: частота пика в системе отсчета наблюдателя ( $\nu_{\text{obs}}$ ) или источника ( $\nu_{\text{intrinsic}}$ ); спектральные индексы ниже ( $\alpha_{\text{below}}$ ) и выше ( $\alpha_{\text{above}}$ ) частоты пика, характеризующие оптически толстую и тонкую области излучения; ширина спектра FWHM на уровне половины мощности излучения, выраженная в декадах частоты [3]. Иногда для объектов GPS вводят ограничения на частоту пика:  $0.5 \leq \nu_{\text{obs}} \leq 10$  ГГц. Объекты с частотами пика меньше 0.5 и больше 10 ГГц относятся к классам CSS (Compact Steep Spectrum) [19–21] и HFP (High-Frequency Peakers) [22] соответственно. Часто используется понятие “классического” или “канонического” спектра GPS-объекта [5]. К этим спектрам относят такие, у которых форма наиболее приближена к теоретической, соответствующей синхротронному излучению однородного объекта с самопоглощением на низких частотах [23]. Например, в работе [5] “каноническим” спектром GPS является радиоспектр со значениями  $\alpha_{\text{below}}$  и  $\alpha_{\text{above}}$  +0.5 и –0.7 соответственно. Ширина спектра FWHM  $\leq 1.2$  рассматривается как один из параметров “классического” GPS в работе [3].

В период 2006–2011 гг. на радиотелескопе RATAN-600 проводился систематический мониторинг 122 GPS-кандидатов. Были получены широкодиапазонные (на частотах 1.1, 2.3, 4.8, 7.7, 11.2 и 21.7 ГГц) мгновенные радиоспектры и некоторые предварительные результаты [24–26]. Обнаружено, что только 25% объектов выборки обладают свойствами “классического” GPS [5]. Высокочастотные спектральные индексы и ширины радиоспектров статистически различаются для GPS-галактик и квазаров [26]. Возможно,

различные физические механизмы или условия окружающей среды играют определяющую роль в формировании спектра GPS-галактик и квазаров, а не только позиционный угол джета [17, 27]. Для дальнейших исследований и сравнения с результатами, полученными нами в период 2006–2011 гг., выборка GPS-объектов была расширена. Для этого были отобраны GPS-кандидаты из полной по плотности потока выборки ( $S_{\nu} \geq 200$  мЯн на частоте 4.8 (или 5) ГГц) с использованием базы данных CATS [28]. Общее число объектов выборки — около 5000. В качестве GPS-кандидатов из нее были отобраны объекты с выпуклыми радиоспектрами — 467 кандидатов. Для GPS-кандидатов, наблюдавшихся на RATAN-600 в период 2006–2011 гг. и попавших в эту выборку, спектральные параметры взяты из работы [26].

В настоящей работе представлены результаты комплексного исследования выборки кандидатов в GPS, которая включает яркие объекты Северного и Южного неба. Недостатком работы является использование неоднородных экспериментальных данных, полученных на разных инструментах в разные эпохи наблюдений. Часть ярких объектов наблюдалась систематически на нескольких частотах по программам мониторинга AGN. Часть объектов на низких и высоких радиочастотах представлена незначительно. В работе исследуются разнообразные наблюдательные параметры объектов с целью возможного разделения галактик и квазаров класса GPS.

## 2. СВОЙСТВА ВЫБОРКИ

Объекты с выпуклыми радиоспектрами выбраны из полной по плотности потока выборки:  $S_{\nu} \geq 200$  мЯн на частоте 4.8/5 ГГц (здесь и далее спектральная плотность потока  $S \sim \nu^{\alpha}$ ). В результате по спектральному типу было отобрано 467 GPS-кандидатов, для 249 из которых имеется информация о красном смещении. Выборка содержит 118 галактик, 187 квазаров и 162 объекта, не отождествленных с оптическими источниками излучения. Список объектов представлен в Таблице 1. Обозначение колонок:

- (1) имя объекта (J2000);
- (2, 3) оптическое отождествление и красное смещение (NASA/IPAC Extragalactic Database);
- (4) частота пика  $\nu_{\text{obs}}$  в системе отсчета наблюдателя в ГГц;
- (5) спектральная плотность потока на частоте пика в Ян;
- (6) ширина спектра на уровне половины мощности пика FWHM в декадах частоты;

Таблица 1. Список объектов и рассчитанные параметры радиоспектров

Имя	Тип	$z$	$\nu_{\text{obs}}$ , GHz	$f_{5\text{GHz}}$ , Jy	FWHM	$\alpha_{\text{below}} \pm \sigma$	$\alpha_{\text{above}} \pm \sigma$	$\theta$ , mas	Тип блазара	Морф.	Var.s, %	Прим.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
000020–322101	Q	1.28	2.56	0.54	1.4	+0.43 ± 0.012	-0.70 ± 0.014	0.38	FSRQ		lack	
000053+405402	G		0.35	1.84	2.0	+0.36 ± 0.009	-0.56 ± 0.002				<25	
000316–194150	G		1.97	0.27	1.5	+0.44 ± 0.017	-0.71 ± 0.007				lack	
000319+212944	G	0.40	3.33	0.21	1.1	+0.37 ± 0.015	-0.90 ± 0.009	0.15	FSRQ	cs0	<25	g*
000346+480703			1.91	0.28	1.3	+1.04 ± 0.027	-1.45 ± 0.018				lack	g
000520+052410	Q	1.89	4.13	0.26	1.3	+0.51 ± 0.006	-0.82 ± 0.005	0.15	FSRQ	cs0	<25	g
000800–233918	Q	1.41	2.90	0.56	1.4	+0.55 ± 0.005	-0.83 ± 0.006	0.33	FSRQ		lack	
001004–685129			1.89	0.28	1.4	+0.09 ± 0.012	-1.21 ± 0.009				lack	
001052–415310	G		0.46	6.84	1.6	+0.13 ± 0.006	-1.14 ± 0.003	10.94			<25	
001534–180726			0.98	0.37	1.8	+0.24 ± 0.002	-0.52 ± 0.007				lack	
002127+731241	G	0.82	0.92	0.72	1.6	+0.31 ± 0.005	-0.89 ± 0.011	1.45			<25	
002225+001456	G	0.31	0.61	3.12	1.7	+0.36 ± 0.008	-0.87 ± 0.002	4.63		cd	<25	
002442–420203	Q	0.94	1.94	2.72	1.3	+0.97 ± 0.003	-1.32 ± 0.004	1.14		cs0	<25	g
002914+345632	G	0.52	1.35	1.76	1.7	+0.56 ± 0.016	-0.43 ± 0.001	1.36		cd	<25	
003714–214525	Q	2.51	5.40	0.24	1.4	+1.07 ± 0.010	-0.27 ± 0.003				lack	
003732+080813	G	1.80	5.15	0.27	1.0	+0.52 ± 0.013	-0.70 ± 0.008	0.12			<25	g
003820–032959	Q	1.86	3.44	0.32	1.3	+0.66 ± 0.004	-1.13 ± 0.012	0.21	FSRQ		<25	g
003830–212004	G	0.34	0.32	1.10	2.3	+0.36 ± 0.008	-0.52 ± 0.005				<25	
004858+064006	Q	3.58	2.69	0.26	1.2	+0.31 ± 0.014	-1.32 ± 0.013				lack	g
005509–412502	Q	2.49	3.25	0.23	1.2	+0.70 ± 0.003	-0.95 ± 0.006	0.21			lack	g
005855–521927	Q		5.00	0.23	1.4	+1.00 ± 0.013	-0.28 ± 0.007		BLLac		lack	

- (7, 8) спектральные индексы ниже ( $\alpha_{\text{below}}$ ) и выше ( $\alpha_{\text{above}}$ ) частоты пика;
- (9) оценка угловых размеров излучающей области в mas;
- (10) тип блазара из каталога BZCAT [29]: FSRQs — квазары с плоским спектром, BL Lac — объекты типа BL Lac, BL Lac cand. — кандидаты в них, Blz.un.t — блазары неопределенного типа;
- (11) морфологический тип по данным VLBI;
- (12) индекс переменности плотности потока в процентах:  $>25$  и  $<25$  — индекс переменности больше и меньше 25% соответственно, “lack” — недостаточно экспериментальных данных для оценки;
- (13) объекты с классическими свойствами GPS (“g”), звездочкой (“g\*”) отмечены объекты, выделенные как GPS в работе [2].

Информация о морфологическом типе взята из работ [3, 10, 30–38], где:

cd = compact double — компактная двойная структура;

cso = compact symmetric — компактная симметричная;

ct = compact triple — компактная тройная;

cx = complex — комплексная;

cj = core-jet — ядро-джет;

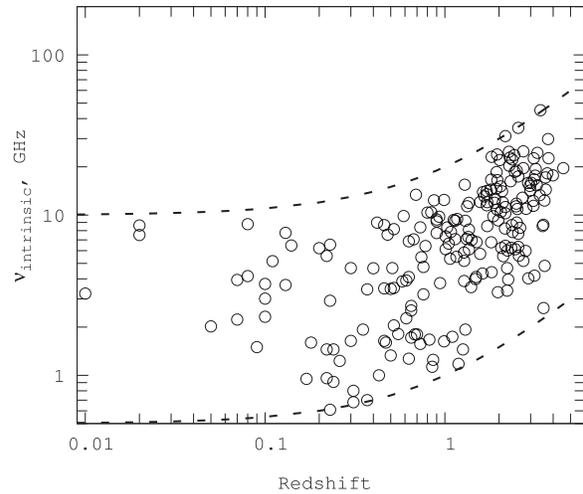
c = core dominated — с доминирующим ядром;

unres = unresolved — неразрешенная.

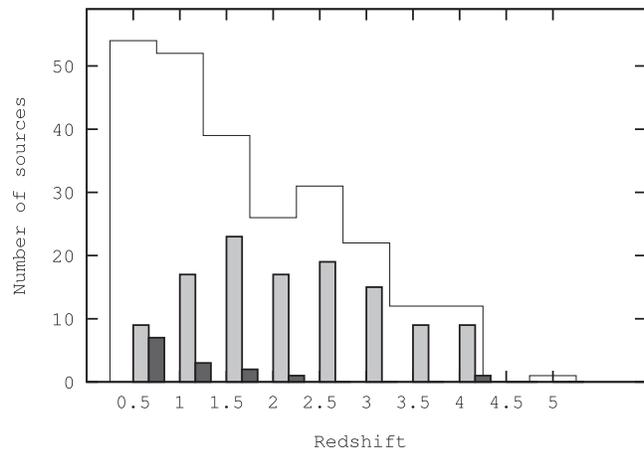
Полный текст Таблицы 1 размещен в Центре астрономических данных в Страсбурге (CDS).

Данных о структурах объектов мало, но галактики чаще имеют компактную симметричную и сложную структуру (cso и cx), квазары — ядро/ядро-джет или неразрешенную структуру (c/cj и un). Это означает, что мощное радиоизлучение большинства GPS-галактик — присущее им свойство, а не является результатом эффекта доплеровского уярчения.

На Рис. 1 представлено соотношение между красным смещением и собственной частотой пика  $z-\nu_{\text{intrinsic}}$  для объектов выборки с наблюдаемой частотой пика  $0.5 \leq \nu_{\text{obs}} \leq 10$  ГГц (см. Раздел 5)  $0.5 \leq \nu_{\text{obs}} \leq 10$  ГГц (см. Таблицу 1). Собственная частота пика растет как  $(1+z)$ . Эволюция частоты пика показана штриховой линией.



**Рис. 1.** Изменение собственной частоты спектрального пика  $\nu_{\text{intrinsic}}$  с изменением красного смещения  $z$  для объектов всей выборки с наблюдаемой частотой пика  $0.5 \leq \nu_{\text{obs}} \leq 10$  ГГц. Штриховой линией показана эволюция для частот 0.5 и 10 ГГц с ростом красного смещения.

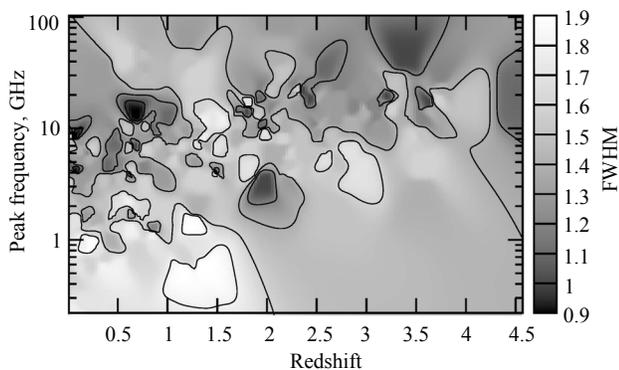


**Рис. 2.** Распределение всех объектов выборки по красным смещениям (тонкая линия); черным выделено распределение объектов типа BL Lac и блазаров с неопределенным типом по классификации [29] (14 объектов), серым — для объектов FSRQ (118 объектов).

### 3. КРАСНЫЕ СМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Красные смещения источников выборки взяты из базы данных NED/IPAC и известны для 53% объектов. Гистограмма распределения по красным смещениям представлена на Рис. 2.

Часть источников выборки (132) представлена в каталоге Roma-BZCAT [29]. Каталог представляет обширный список блазаров, основанный на данных многочастотных обзоров и тщательном обзоре литературы, и содержит 3149 объектов.



**Рис. 3.** Соотношение “красное смещение—частота пика—ширина радиоспектра” ( $z-\nu_{\text{intrinsic}}-\text{FWHM}$ ) для всех объектов выборки, имеющих спектральный максимум в радиодиапазоне. Частота пика представлена в системе отсчета источника. Большая часть радиисточников с узкими спектрами локализована в областях красных смещений  $z < 1$  и  $z > 3$ .

Включение GPS-кандидатов в каталог блазаров связано с проблемой определения их природы, которая все еще является предметом многочисленных дискуссий. По общепринятой классификации объекты со спектральным пиком на высоких частотах (десятки ГГц) относятся к так называемым High-Frequency Peakers, или HFP-объектам [22]. HFP- и GPS-источники представляют смесь галактик и квазаров, среди которых встречаются и объекты типа BL Lac. Многочастотные исследования выявили, что некоторые из этих источников действительно переменны и форма их спектра меняется от выпуклого до плоского [6, 26]. Такое изменение послужило для авторов каталога основанием предположить наличие связи между GPS/HFP и блазарами. Для большинства радиисточников имеется недостаточно экспериментальных данных по частоте и времени. Поэтому GPS-объекты, имеющие свойства блазаров [29], включены в каталог Roma-BZCAT.

На гистограмме распределения источников по  $z$  (Рис. 2) выделены объекты FSRQ и BL Lac. На рисунке видно, что в нашу выборку попала значительная доля блазаров, часть из которых на малых  $z$  — это объекты типа BL Lac и кандидаты в них (3 шт.), на больших  $z$  — FSRQ (118 шт.), и 11 объектов — блазары с неопределенным типом.

На Рис. 3 представлено соотношение “красное смещение—частота пика—ширина радиоспектра” ( $z-\nu_{\text{intrinsic}}-\text{FWHM}$ ) для всех объектов выборки, имеющих спектральный максимум в радиодиапазоне. Такое соотношение отражает распределение компактных объектов с относительно однородным синхротронным излучением. Так как в

соотношение включены все объекты (467), то оно содержит и объекты в момент активности, когда излучение компактных ядерных областей доминирует, при этом форма радиоспектра становится временно выпуклой. На рисунке хорошо видно, что радиисточники с наиболее узкими спектрами ( $\text{FWHM} \leq 1.1$ ) локализованы в областях красных смещений  $z < 1$  и  $z > 3$ .

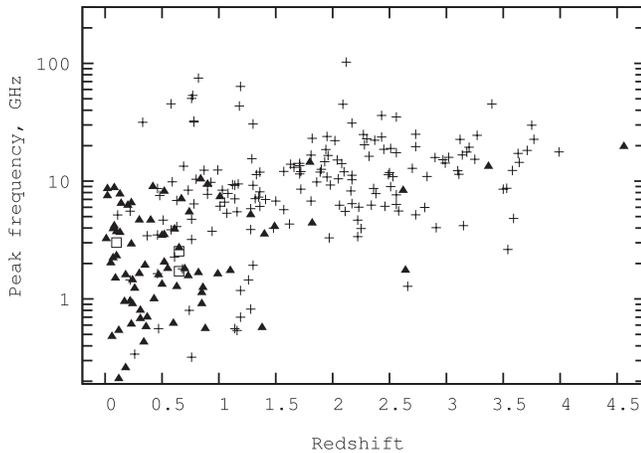
Соотношения “красное смещение—частота пика” показаны для галактик и квазаров на Рис. 4, а для FSRQ, объектов типа BL Lac, блазаров неопределенного типа и объектов, не имеющих свойств блазаров, — на Рис. 5. Так как блазары характеризуются переменным радиоизлучением, то в выборку попадает значительное число объектов со временно выпуклыми радиоспектрами. Легко увидеть, что Рис. 4 и Рис. 5 похожи: объекты выборки распределены по красным смещениям так, что большинство квазаров совпадает с объектами FSRQ из каталога BZCAT, а большинство галактик — с объектами, не имеющими свойств блазаров. Поэтому большая доля квазаров выборки может не являться GPS-источниками.

#### 4. ПЕРЕМЕННОСТЬ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

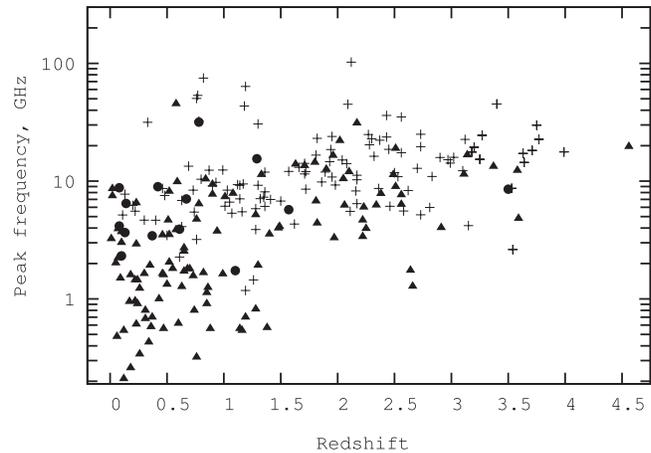
При расчете параметров радиоспектров объектов использовался модуль `spg` системы `FADPS` [39]. Спектральные индексы  $\alpha_{\text{above}}$  и  $\alpha_{\text{below}}$  рассчитывались путем аппроксимации радиоспектра прямой в областях выше и ниже частоты пика. Частота пика и ширина спектра для простоты рассчитывались путем аппроксимации спектра параболой. Для количественной оценки переменности плотности потока использовалась формула индекса переменности из [40]:

$$\text{Var}_S = \frac{(S_{\text{max}} - \sigma_i)_{\text{max}} - (S_i + \sigma_i)_{\text{min}}}{(S_i - \sigma_i)_{\text{max}} + (S_i + \sigma_i)_{\text{min}}}, \quad (1)$$

где  $S_i$  и  $\sigma_i$  — значение плотности потока и его ошибка на  $i$ -ю эпоху наблюдений,  $\text{max}$  и  $\text{min}$  — индексы, соответствующие максимальному и минимальному значениям плотности потока соответственно. Экспериментальные данные о плотностях потоков на разных частотах, представленные в доступных каталогах, неоднородны. Для оценок переменности рассчитывались значения индекса переменности на тех частотах, где наблюдения проводились неоднократно: 960, 1400, 2700, 4800, 5000, 7700, 11 200, 15 000, 31 400 и 95 600 МГц. Почти половина объектов имеют амплитуду переменности до 25%. Для примерно 42% источников недостаточно экспериментальных данных для оценок уровня переменности. Максимального значения (53%) амплитуда переменности достигает на частоте 15 ГГц у объекта J 1558–1410.



**Рис. 4.** Соотношение “красное смещение—частота пика  $\nu_{\text{obs}}$ ” для галактик (треугольники), квазаров (крестики) и неотожествленных радиоисточников (квадраты) объектов выборки с известным  $z$ .



**Рис. 5.** Соотношение “красное смещение—частота пика  $\nu_{\text{obs}}$ ” для FSRQ (крестики), BL Lacs и блазаров неопределенного типа (кружки) и объектов, не имеющих свойств блазаров (треугольники); соотношение построено для всех объектов с известным  $z$ .

## 5. GPS-КАНДИДАТЫ

Для отбора GPS-кандидатов использовались следующие критерии, принятые в работах [3, 5, 41]:

- спектральные индексы  $\alpha_{\text{below}}$  и  $\alpha_{\text{above}}$   $+0.5$  и  $-0.7$  соответственно;
- FWHM  $\leq 1.2$  декады частоты;
- частота пика  $\nu_{\text{obs}} \geq 500$  МГц;
- индекс переменности  $\text{Var}_S \leq 25\%$ .

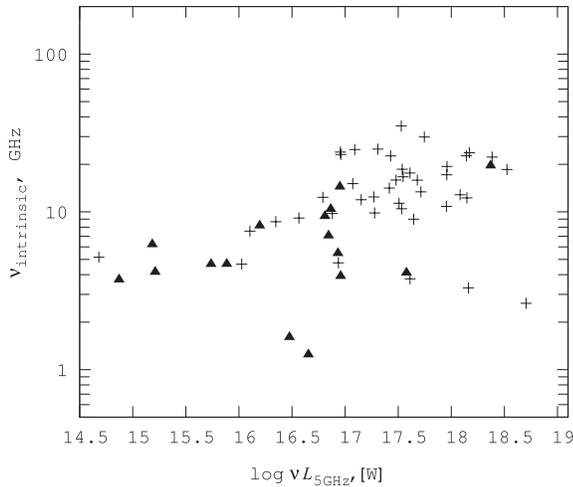
В этих работах спектральные индексы оценивались по среднему нормированному на максимальный поток радиоспектру. Нормированный радиоспектр для отдельного объекта строился путем приведения частоты и плотности потока в пике к единице [5]. Далее нормированные радиоспектры GPS-кандидатов осреднялись. Для разделения объектов GPS и CSS (Compact Steep Spectrum) [19–21] дополнительным параметром является наблюдаемая частота пика, которая для объектов CSS приходится на частоты менее 500 МГц. Ограничение на индекс переменности вводится для частичного исключения переменных квазаров с плоскими спектрами [6, 26]. В настоящей работе уделено внимание переменности плотности потока на наиболее распространенных экспериментальных частотах: объекты с амплитудой переменности больше 25% более чем на двух частотах, по-видимому, являются блазарами, квазарами с плоским спектром или лацертидами.

После анализа радиоспектров всех 467 источников было обнаружено только 44 объекта со свойствами классического GPS. Это составляет

приблизительно 10% от всех источников со спектральным максимумом (467) и всего лишь примерно 1% от всей нашей выборки (около 5000 объектов). Учитывая неоднородность данных и возможность пропустить часть объектов из-за неточно измеренных параметров мы расширили критерии отбора и дополнили список кандидатов объектами с  $\text{FWHM} \leq 1.4$  и  $\alpha_{\text{below}}$  и  $\alpha_{\text{above}}$  порядка  $+0.5$  и  $-0.7$  соответственно. Выбранные таким образом GPS-кандидаты отмечены буквой “g” в Таблице 1. Это составляет приблизительно 2% от исходной выборки. В результате отобрано 112 объектов со свойствами классических GPS и возможные кандидаты. Из них 43 — это квазары, 18 — галактики, и 48 — неотожествленные объекты. Оценки параметров радиоспектров для выбора GPS-кандидатов сделаны по данным CATS или PATAN-600 (такие объекты обозначены в Таблице 1 звездочкой “g\*”).

## 6. СООТНОШЕНИЕ “ПИКОВАЯ ЧАСТОТА—РАДИОСВЕТИМОСТЬ”

На графике зависимости собственной частоты пика от красного смещения (Рис. 1) можно заметить, что в области больших красных смещений и малых  $\nu_{\text{intrinsic}}$  наблюдается дефицит объектов. Возможно, далекие объекты имеют неизвестные красные смещения, и при крутых радиоспектрах и низкой частоте пика они не достигают больших радиосветимостей. Тогда они заполняют нижнюю правую часть плоскости “ $z-\nu_{\text{intrinsic}}$ ” Рис. 1. Для того чтобы различить объекты с сильной и слабой радиосветимостью с малой частотой пика, мы рассмотрели соотношение “радиосветимость



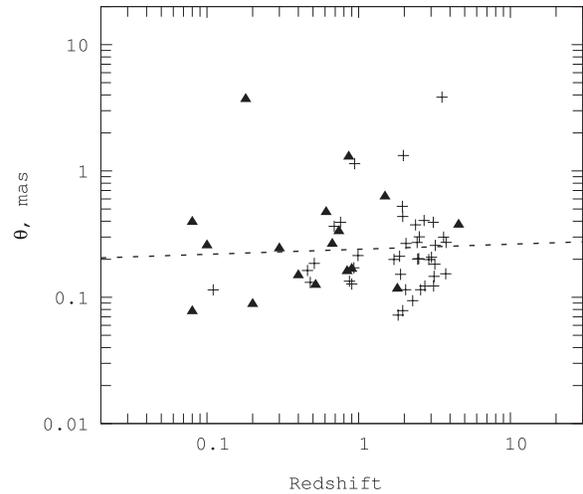
**Рис. 6.** Собственная частота  $\nu_{\text{intrinsic}}$  в зависимости от радиосветимости для галактик (треугольники) и квазаров (крестики).

$\log(\nu L_{5\text{ГГц}})$ —частота пика  $\nu_{\text{intrinsic}}$ ” (Рис. 6). Для вычисления светимости на частоте 5 ГГц использовались стандартные соотношения, при подсчетах приняты следующие значения космологических постоянных:  $H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ,  $\Omega_m = 0.27$ , и  $\Omega_\Lambda = 0.73$ . В построении использовались данные из выборки GPS-кандидатов (“g” в Таблице 1), включающей 112 источников. Из-за отсутствия данных о красных смещениях для некоторых объектов на графике представлены 17 галактик и 41 квазар.

Существующая антикорреляция между частотой пика и угловыми размерами (формула (2)) [23, 45, 46] предполагает, что дефицит объектов в нижнем правом углу Рис. 1 означает, что на больших  $z$  отсутствуют крупные компоненты синхротронного самопоглощения. Если рассматривать свободно-свободное поглощение как возможную причину перегиба GPS-спектра на низких частотах, то снова подтверждается наличие вещества с высокой плотностью в околоядерных областях молодых объектов. В работе [5] для выборки из 72 GPS-кандидатов обнаружено резкое уменьшение размеров объектов и увеличение  $\nu_{\text{intrinsic}}$  с ростом радиосветимости (обратное не верно). Что приводит к дефициту крупных объектов с высокими радиосветимостями на больших красных смещениях.

## 7. ОЦЕНКА УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ

GPS-источники могут состоять из нескольких компонент. Регистрируемое излучение является суммой излучения всех компонент (когда источник является точечным для диаграммы направленности). Мы можем сделать оценку верхнего



**Рис. 7.** Угловые размеры излучающей области относительно красного смещения GPS-кандидатов. Обозначения — как на Рис. 6.

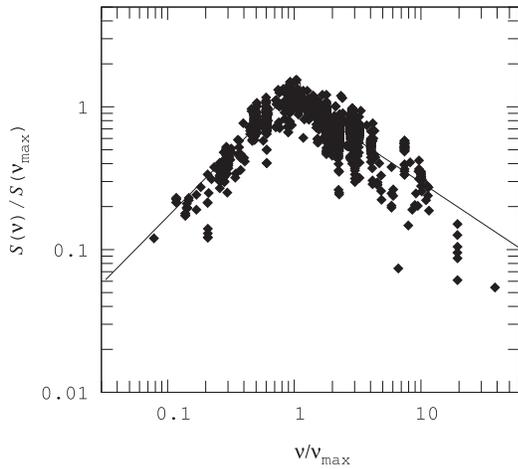
предела размера области образования излучения, предполагая ответственным за образование пика в спектре GPS-источника процесс синхротронного самопоглощения (а не свободно-свободное поглощение). В однородном по структуре и магнитному полю источнике радиоизлучения с самопоглощением и степенным распределением электронов по энергиям частота максимума излучения определяется как [23]

$$\nu_{\text{max}} = 8B^{1/5} S_{\text{max}}^{2/5} \theta^{-4/5} (1+z)^{1/5}, \quad (2)$$

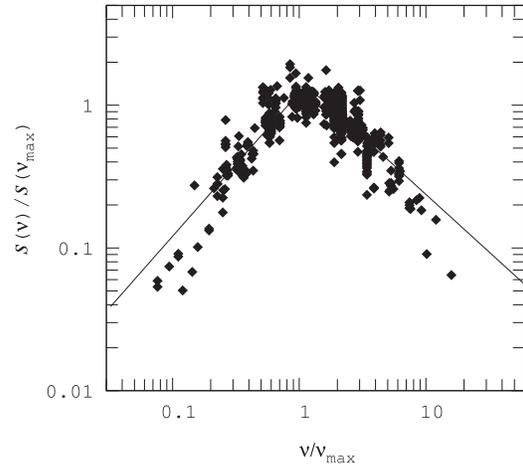
где  $B$  — магнитное поле в Гауссах,  $S_{\text{max}}$  — значение плотности потока в максимуме радиоспектра в Ян,  $\theta$  — угловой размер в mas и  $\nu_{\text{max}}$  — частота максимума в ГГц. Принимая величину магнитных полей для компактных радиоисточников равными  $100 \mu\text{G}$  [42], получаем для угловых размеров источника

$$\theta \approx 1.345 \frac{\sqrt{S_{\text{max}}(1+z)^{1/4}}}{\nu_{\text{max}}^{5/4}}. \quad (3)$$

Данное соотношение определяет верхний предел размера области излучения (формирующей “выпуклый” радиоспектр) и не имеет отношения к общему размеру объекта. Для объектов с известным красным смещением из выборки GPS-кандидатов (“g”) построена зависимость углового размера  $\theta$  от красного смещения  $z$  (Рис. 7). Для выбранных GPS-объектов угловые размеры не превышают 10 mas, что хорошо согласуется с данными измерений размеров компактных объектов методом VLBI [43, 44]. В среднем у квазаров из выборки угловые размеры меньше чем у галактик, а на одинаковых  $z$  они имеют угловые размеры одного порядка. Существующая антикорреляция между



**Рис. 8.** Нормированный радиоспектр GPS-квazarов, основанный на исследуемой выборке кандидатов (“g” в Таблице 1). Метод наименьших квадратов дает спектральные индексы  $\alpha_{\text{below}} = +0.90 \pm 0.002$ ,  $\alpha_{\text{above}} = -0.59 \pm 0.001$ .



**Рис. 9.** Нормированный радиоспектр GPS-галактик, основанный на исследуемой выборке кандидатов (“g” в Таблице 1). Метод наименьших квадратов дает спектральные индексы  $\alpha_{\text{below}} = +1.01 \pm 0.002$ ,  $\alpha_{\text{above}} = -0.81 \pm 0.002$ .

линейными размерами и частотами пиков [45, 46] означает, что более мощные по светимости и с большими  $z$  (см. Рис. 4) квазары более компактны, так как имеют большие значения  $\nu_{\text{intrinsic}}$  (Рис. 6).

## 8. НОРМИРОВАННЫЙ РАДИОСПЕКТР

Для сравнения формы спектров GPS-галактик и квазаров (“g”) построены их нормированные радиоспектры (Рис. 8 и 9). Нормирование на наблюдаемые пиковые частоты и плотности потока в максимуме позволяет сравнивать радиоспектры между собой [5]. По красному смещению мы можем увидеть эволюционные воздействия на форму радиоспектра, используя различные интервалы  $z$ . Теоретически все радиоспектры должны проходить через одну точку:  $\nu/\nu_{\text{max}} = 1$  и  $S(\nu)/S(\nu_{\text{max}}) = 1$ . Вариации плотностей потоков на различных инструментах и приближенное определение максимума (с использованием параболы) являются причиной некоторого разброса точек в максимуме нормированного спектра. Нормированный радиоспектр смоделирован в виде двух линий в логарифмическом масштабе, пересекающихся в максимуме. Максимум определен так, как было описано в Разделе 4. Параметры нормированного радиоспектра GPS-галактик и квазаров представлены в Таблице 2. В целом, средний радиоспектр GPS-галактик более крутой на частотах выше и ниже пика. В результате галактики имеют более узкий средний нормированный радиоспектр  $\text{FWHM} = 1.4$ , чем квазары  $\text{FWHM} = 1.6$ .

Выборка разделена на интервалы по красным смещениям  $z = 0-1$  и  $1-5$  для определения различия между галактиками и квазарами GPS. Для

выявления действия эволюции на форму спектров красные смещения GPS-кандидатов разделены на интервалы  $z = 0-2$  и  $2-5$ . Результат представлен в Таблице 3, откуда видно, что  $\alpha_{\text{below}}$  меняется на величину примерно 0.2 начиная с  $z = 1$ . Отметим, ранее в литературе сообщалось, что нет статистического различия в средних значениях  $\alpha_{\text{below}}$  для подгрупп галактик и квазаров GPS [3, 5, 6]. Спектральный индекс  $\alpha_{\text{above}}$  меняется в процессе эволюции и различается для разных типов объектов на величину 0.04–0.07. Таким образом, среднее значение  $\alpha_{\text{above}}$  для галактик в среднем больше. Значение  $\alpha_{\text{below}}$  растет по модулю с ростом  $z$ .

**Таблица 2.** Параметры нормированного радиоспектра галактик и квазаров GPS

Тип	$\alpha_{\text{below}}$	$\alpha_{\text{above}}$	FWHM
G	$+1.01 \pm 0.002$	$-0.81 \pm 0.002$	1.4
QSO	$+0.90 \pm 0.002$	$-0.59 \pm 0.001$	1.6

**Таблица 3.** Спектральные параметры для различных интервалов  $z$

Интервал $z$	$\alpha_{\text{below}}$	$\alpha_{\text{above}}$	FWHM
0–1	$+0.73 \pm 0.04$	$-0.87 \pm 0.06$	1.16
1–5	$+0.93 \pm 0.06$	$-0.80 \pm 0.04$	1.16
0–2	$+0.79 \pm 0.05$	$-0.85 \pm 0.05$	1.16
2–5	$+0.93 \pm 0.06$	$-0.81 \pm 0.05$	1.17

## 9. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящем исследовании выделено порядка 2% “классических” GPS-объектов, что значительно меньше ожидаемых 10% [2]. Это связано с тем, что основные исследования GPS-объектов [2–5] используют данные наблюдений, которые проводились не одновременно и недостаточно длительно. В настоящей работе классификация основана на разнородных экспериментальных данных (CATS) и данных одновременных и продолжительных измерений на радиотелескопе РАТАН-600. Список выбранных кандидатов содержит треть представителей FSRQs — 37 объектов, которые могут не являться GPS. Информация о их переменности противоречива. Долговременный мониторинг [26] показывает, что значительная часть GPS-объектов переменна в радиодиапазоне (десятки процентов), а слабая переменность — достаточно редкое явление. Оно чаще наблюдается у галактик GPS и, возможно, связано с недостатком наблюдений на разнообразных частотах [6, 25, 47]. В настоящей работе оценивается индекс переменности  $\text{Var}_S$ . Для значительной части объектов он не отражает реального изменения спектральной плотности потока  $S_\nu$  на всех частотах из-за неоднородности имеющегося экспериментального материала.

Очевидно, что GPS-источники представляют собой разнородную группу объектов, схожесть свойств наблюдается для подгрупп или единичных объектов. GPS-квазары не рассматриваются в литературе так часто, как галактики. В настоящее время известно, что GPS-квазары имеют меньшие линейные размеры (возможно из-за ориентации джета относительно наблюдателя), большие красные смещения, частоты пика и большую переменность. O’Dea [8] на основе исследования небольшой выборки квазаров (21 объект) установил, что половина ультрадалеких ( $z \geq 3$ ) квазаров являются GPS и половина GPS-квазаров находится на больших  $z$ . В работе [48] авторы связывают это с наличием плотной газопылевой среды вокруг квазаров на больших красных смещениях, из-за которой излучение не может распространяться через межзвездную среду. Необычно крутые по сравнению с обычными квазарами радиоспектры GPS-квазаров предполагают, что при синхротронном излучении потери энергии играют доминирующую роль при ограниченном объеме объекта.

В настоящем исследовании установлено, что численность GPS-галактик резко падает с увеличением красного смещения, начиная с  $z = 1$ . Нами не обнаружено GPS-галактик в достаточно большом диапазоне красных смещений — от 1.8 до 4.5 (Рис. 3, 4), как не обнаружено и неотжествленных с оптическими источниками объектов.

Однако, в этом интервале  $z$  встречается значительное число квазаров, не имеющих свойств блазаров (Рис. 5). Самым далеким GPS-объектом является галактика J 1606+31 ( $z = 4.56$ ,  $\theta = 0.37$  mas). Это единственная GPS-галактика в выборке с большим красным смещением. Отсутствие далеких GPS-галактик может быть связано и с тем, что из-за крутого радиоспектра они не были обнаружены в существующих обзорах радиисточников, в отличие от более ярких квазаров. Возможно, необходимо исследование физических условий окружающей среды на больших и малых красных смещениях.

Обнаружены различия спектральных свойств GPS-галактик и квазаров. Объединяет их достаточно простая форма радиоспектра. В отличие от других внегалактических компактных радиисточников они не имеют близкого к нулю спектрального индекса, а отличаются крутыми спектрами на частотах ниже и выше максимума. Механизм поглощения в оптически толстой области излучения до конца не изучен. Существует общее предположение, что низкочастотный завал спектра происходит из-за синхротронного самопоглощения, обусловленного наличием среды с высокой плотностью излучающих электронов [27]. Механизм свободно-свободного поглощения рассматривается как возможная причина наличия максимума в спектре [49]. Подобная форма радиоспектра хорошо описывается моделью синхротронного излучения внегалактического источника [23]. Она связывает выпуклую форму радиоспектра с компактностью, однородностью структуры и магнитного поля. Однако по результатам измерений на VLBI объекты GPS не имеют однородной радиоструктуры (см. Таблицу 1) и однородного магнитного поля. Поэтому экспериментальные данные находятся в некотором противоречии с теорией и параметры радиоспектров никогда не достигают расчетных величин —  $\alpha_{\text{below}} = +2.5$  и  $\text{FWHM} = 0.7$  [2, 3].

Обнаружено, что у галактик и квазаров GPS значения  $\alpha_{\text{above}}$  и  $\text{FWHM}$  различаются. Этот результат подтвердил полученные ранее средние значения спектральных параметров при мониторинге ограниченного списка GPS-источников на РАТАН-600 [26]. Энергетический спектр галактик [23] оказался заметно круче — показатель степени  $\gamma$  больше на 0.4–0.5 [26], чем у квазаров. Здесь  $\gamma$  — показатель степени в распределении  $N(E) = KE^{-\gamma}$  излучающих релятивистских электронов по энергиям. Это может быть связано как с дополнительными энергетическими потерями у галактик [50], так и с возможным наличием добавочных компактных компонент у квазаров. Анализ такого различия должен быть предметом отдельного самостоятельного исследования.

Наблюдается увеличение низкочастотного спектрального индекса  $\alpha_{\text{below}}$  с увеличением  $z$ , причем, для галактик и квазаров он практически не различается. Это может быть связано, например, с увеличением плотности окружающей среды с ростом красного смещения [8], с отсутствием систематических измерений на низких частотах или с использованием неодновременных экспериментальных данных.

Угловые размеры излучающей области отобранных GPS-кандидатов не превышают 10 мас. При одинаковом  $z$  галактики и квазары имеют угловые размеры одного порядка, при этом их светимости могут на порядок различаться. Прямые и косвенные оценки размеров указывают на большую компактность GPS-квазаров, что дает основания предположить наличие плотной окружающей среды. Следует учесть, что из-за больших красных смещений квазаров возможное излучение протяженных областей находится ниже предела обнаружения систем апертурного синтеза [17].

Являются ли GPS-галактики и квазары одними и теми же объектами по сценарию Объединенной модели (Unified Scheme Models) [51] или имеют лишь сходную форму радиоспектра? Предположение, что это разные типы населения, обсуждалось неоднократно [11, 52]. Полученные в работе результаты говорят в пользу различия физической природы GPS-галактик и квазаров. Настоящее исследование поставило ряд конкретных задач, которые требуют отдельного исследования GPS-галактик и квазаров (изучение физических условий в околоядерных областях, темпов аккреции и пр.), а также моделирования механизмов синхротронного излучения однородных объектов при заданных спектральных параметрах, полученных в этой работе.

## 10. ВЫВОДЫ

В результате анализа данных, полученных на РАТАН-600 и доступных каталогов (CATS), сформирована полная по плотности потока новая выборка GPS-кандидатов (112 объектов). Комплексное исследование объектов привело к следующим выводам:

Из 467 объектов с максимумом в спектре выбрано 112 GPS-кандидатов. Это составляет примерно 2% от полной выборки с плотностью потока  $S_\nu \geq 200$  мЯн на частоте 4.8/5 ГГц. Из выбранных GPS-кандидатов только 45 объектов строго соответствуют классическим GPS. Это составляет приблизительно 1%, что значительно меньше чем ожидалось: принято считать, что GPS-объекты составляют примерно десятую часть от ярких (в сантиметровом диапазоне) внегалактических источников.

В результате исследования параметров радиоспектров выявлено, что GPS-галактики имеют наиболее узкие спектры и большие высокочастотные спектральные индексы, чем квазары. Наблюдается увеличение низкочастотного спектрального индекса с ростом красного смещения  $z$ , причем для галактик и квазаров его значения сравнимы.

Численность GPS-галактик выборки резко падает с увеличением красного смещения, начиная с  $z = 1$ . Галактики и квазары при одинаковом  $z$  имеют угловые размеры одного порядка, при этом их светимости могут на порядок отличаться. Наблюдается дефицит объектов на больших красных смещениях с низкими частотами пика (несколько ГГц). Возможно, на больших  $z$  отсутствуют объекты с крупными компонентами синхротронного самопоглощения. Различные косвенные оценки подтверждают наличие вещества с высокой плотностью излучающих частиц в околоядерных областях GPS-объектов.

Выборка значительно “загрязнена” объектами FSRQs — Flat Spectrum Radio Quasars. В результате в список GPS включены блазары, которые будут рассматриваться более тщательно из-за нерешенного вопроса о природе GPS.

## БЛАГОДАРНОСТИ

При исследовании использовалась система поддержки астрофизических каталогов CATS [28] (<http://www.sao.ru/cats>), база данных внегалактических объектов NASA/IPAC Extragalactic Database (<http://ned.ipac.caltech.edu>), многочастотный каталог блазаров “Roma-BZCAT: Multi-Frequency Catalogue of Blazars” [29], (<http://www.asdc.asi.it/bzcat>), система обработки FADPS [39] для данных широкополосных радиометров континуума радиотелескопа РАТАН-600. Наблюдения проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 14.518.11.7054) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-02-31649).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. A. T. Spoelstra, A. R. Patnaik, and Gopal-Krishna, *Astronom. and Astrophys.* **152**, 38 (1985).
2. Ch. P. O’Dea, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **110**, 493 (1998).
3. Ch. P. O’Dea, S. A. Baum, and C. Stanghellini, *Astrophys. J.* **380**, 66 (1991).
4. Ch. P. O’Dea, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **110**, 493 (1998).
5. W. H. de Vries, P. D. Barthel, and Ch. P. O’Dea, *Astronom. and Astrophys.* **321**, 105 (1997).

6. I. Tornainen, M. Tornikoski, H. Terasranta, and M. F. Aller, *Astronom. and Astrophys.* **435**, 839 (2005).
7. Ch. P. O'Dea, C. Stanghellini, S. A. Baum, and S. Charlot, *Astrophys. J.* **470**, 806 (1996).
8. Ch. P. O'Dea, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **245**, 20 (1990).
9. C. Stanghellini, Ch. P. O'Dea, D. Dallacasa, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **131**, 303 (1998).
10. C. Stanghellini, Ch. P. O'Dea, S. A. Baum, et al., *Astronom. and Astrophys.* **325**, 943 (1997).
11. C. Stanghellini, D. Dallacasa, Ch. P. O'Dea, et al., *Astronom. and Astrophys.* **377**, 377 (2001).
12. R. B. Phillips and R. L. Mutel, *Astronom. and Astrophys.* **106**, 21 (1982).
13. A. G. Polatidis and J. E. Conway, *Publ. Astronom. Soc. Australia* **20**, 69 (2003).
14. C. Fanti, R. Fanti, D. Dallacasa, et al., *Astronom. and Astrophys.* **302**, 317 (1995).
15. A. C. S. Readhead, G. B. Taylor, W. Xu, et al., *Astrophys. J.* **460**, 612 (1996).
16. S. A. Baum, Ch. P. O'Dea, D. W. Murphy, and A. G. de Bruyn, *Astronom. and Astrophys.* **232**, 19 (1990).
17. C. Stanghellini, *Publ. Astronom. Soc. Australia* **20**, 118 (2003).
18. J. M. Bai and M. G. Lee, Jr. *Korean Astron. Soc.* **38**, 125 (2005).
19. J. A. Peacock and J. V. Wall, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **198**, 843 (1982).
20. W. J. M. van Breugel, G. Miley, and T. Heckman, *Astronom. J.* **89**, 5 (1984).
21. C. Fanti, R. Fanti, P. Parma et al., *Astronom. and Astrophys.* **143**, 292 (1985).
22. D. Dallacasa, C. Stanghellini, M. Centonza, and R. Fanti, *Astronom. and Astrophys.* **363**, 887 (2000).
23. K. I. Kellermann and I. I. Pauliny-Toth, *Annu. Rev. Astronom. Astrophys.* **19**, 373 (1981).
24. M. G. Mingaliev, Yu. V. Sotnikova, M. G. Larionov, and A. K. Erkenov, *Astronomy Reports* **55**, 187 (2011).
25. M. Tornikoski, I. Tornainen, A. Lahteenmaki, et al., *Astron. Nachr.* **330**, 128 (2009).
26. M. G. Mingaliev, Yu. V. Sotnikova, I. Tornainen, et al., *Astronom. and Astrophys.* **544**, A25 (2012).
27. I. A. G. Snellen, R. T. Schilizzi, A. G. de Bruyn, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **131**, 435 (1998).
28. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, and V. N. Chernenkov, *Baltic Astronomy* **6**, 275 (1997).
29. E. Massaro, P. Giommi, C. Leto, et al., *Astronom. and Astrophys.* **495**, 691 (2009).
30. M. Orienti, D. Dallacasa, S. Tinti, and C. Stanghellini, *Astronom. and Astrophys.* **450**, 959 (2006).
31. P. Augusto, J. I. Gonzalez-Serrano, I. Perez-Fournon, and P. N. Wilkinson, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **368**, 1411 (2006).
32. S. Jeyakumar, D. J. Saikia, A. Pramesh Rao, and V. Balasubramanian, *Astronom. and Astrophys.* **362**, 27 (2000).
33. L. Xiang, D. Dallacasa, P. Cassaro, et al., *Astronom. and Astrophys.* **434**, 123 (2005).
34. A.L. Fey and P. Charlot, *Astrophys. J. Suppl.* **111**, 95 (1997).
35. L. Xiang, C. Reynolds, R. G. Strom, and D. Dallacasa, *Astronom. and Astrophys.* **454**, 729 (2006).
36. D. Dallacasa, M. Bondi, W. Alef, and F. Mantovani, *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **129**, 219 (1998).
37. N. E. Gugliucci, G. B. Taylor, A. B. Peck, and M. Giroletti, *Astrophys. J.* **622**, 136 (2005).
38. M. L. Lister, K. I. Kellermann, and I. I. K. Pauliny-Toth, in *Proc. 6th EVN Symp.*, Ed. by E. Ros, R. W. Porcas, A. P. Lobanov, and J. A. Zensus (2000), p. 135.
39. O. V. Verkhodanov, *ASP Conf. Ser.* **125**, 46 (1997).
40. M. F. Aller, H. D. Aller, and P. A. Hughes, *Astronom. J.* **399**, 16 (1992).
41. P. G. Edwards and S. J. Tingay, *Astronom. J.* **424**, 91 (2004).
42. R. L. Mutel, M. W. Hodges, and R. B. Phillips, *Astronom. J.* **290**, 86 (1985).
43. T. J. Pearson and A. C. S. Readhead, *Astronom. J.* **328**, 114 (1988).
44. D. Dallacasa, C. Fanti, R. Fanti, et al., *Astronom. and Astrophys.* **295**, 27 (1995).
45. R. Fanti, C. Fanti, R. T. Schilizzi, et al., *Astronom. and Astrophys.* **231**, 333 (1990).
46. Ch. P. O'Dea and S. A. Baum, *Astronom. J.* **113**, 148 (1997).
47. M. Tornikoski, I. Jussila, P. Johansson, et al., *Astronom. J.* **121**, 1306 (2001).
48. P. D. Barthel and G. K. Miley, *Nature* **333**, 319 (1988).
49. G. V. Bicknell, M. A. Dopita, and Ch. P. O'Dea, *Astronom. J.* **485**, 112 (1997).
50. N. S. Kardashev, *Sov. Astron.* **6**, 317 (1962).
51. C. M. Urry and P. Padovani, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **107**, 803 (1995).
52. I. A. G. Snellen, PhD Thesis (Univ. of Leiden, 1997).

**Gigahertz-Peaked Spectrum (GPS) Galaxies and Quasars****M. G. Mingaliev, Yu. V. Sotnikova, T. V. Mufakharov, A. K. Erkenov, R. Yu. Udovitskiy**

The results of a comprehensive analysis of continuous radio spectra of a sample of Gigahertz-Peaked Spectrum (GPS) sources are reported. The sources are selected from a flux-density-complete sample ( $S_\nu \geq 200$  mJy at 4.8 or 5 GHz) using multifrequency measurements of the RATAN-600 radio telescope and data from the CATS astrophysical catalogs support system. The analysis revealed a very small number (1–2%) of “classical” GPS objects, which is significantly less than the expected fraction of 10%. GPS galaxies are found to have narrower and steeper radio spectra than quasars. The low-frequency part of the spectrum is seen to become steeper with increasing redshift. Galaxies and quasars at the same  $z$  have comparable angular sizes, whereas their luminosities may differ by one order of magnitude. At large redshifts there is a deficit of objects with low (several GHz) peak frequencies. The number of GPS galaxies decreases sharply with redshift, and most of them are found at  $z$  between 0.01 and 1.81. GPS quasars are found at large redshifts, from 0.11 to 3.99. A quarter of the sample consists of blazars whose spectra may temporarily have a convex shape when the object is in active state.

Key words: *galaxies: general—galaxies: active—radio continuum: galaxies*