

## МНОГОЧАСТОТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ GPS-ИСТОЧНИКОВ

© 2019 Ю. В. Сотникова<sup>1\*</sup>, Т. В. Муфхаров<sup>2,3</sup>, Е. К. Майорова<sup>1</sup>,  
М. Г. Мингалиев<sup>1,2</sup>, Р. Ю. Удовицкий<sup>1</sup>, Н. Н. Бурсов<sup>1</sup>, Т. А. Семенова<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>Shanghai Astronomical Observatory, Shanghai 200030, China

Поступила в редакцию 11 января 2019 года; после доработки 27 июня 2019 года; принята к публикации 27 июня 2019 года

Gigahertz-Peaked spectrum (GPS) — компактные активные ядра галактик, предположительно молодые предшественники ярких радиоисточников, представляющие интерес как ранние стадии их эволюции. Исследование радиосвойств GPS дает информацию об особенностях синхротронного излучения во внегалактических структурах. В прикладной области исследований GPS являются полезными как компактные стационарные радиоисточники на небе. В работе представлены результаты многочастотного исследования GPS, основанного на квазидновременных измерениях на радиотелескопе РАТАН-600 в период 2006–2017 гг. Получен каталог спектральных плотностей потоков GPS на шести частотах: 1.1, 2.3, 4.8, 7.7/8.2, 11.2 и 21.7 ГГц. Дополнительно для анализа радиоспектров привлечены данные низкочастотных обзоров GLEAM (GaLactic and Extragalactic Allsky Murchison widefield array survey) и TGSS (Tata institute for fundamental research GMRT Sky Survey) и высокочастотные измерения Planck. Выявлено 164 GPS и кандидата (17 из них — новые), что составляет незначительную долю GPS в исходной выборке ярких АЯГ — порядка 2%. Обнаружена неоднородность физических свойств и условий формирования синхротронного излучения в GPS разных типов АЯГ. Подтвержден дефицит далеких GPS ( $z > 2$ ) с низкими значениями частоты максимума (менее 1 ГГц). Существующая антикорреляция «размер — частота максимума» имеет непрерывный характер. Наблюдается статистическое укрупнение континуальных радиоспектров объектов с ростом красного смещения.

Ключевые слова: радиоконтинуум: галактики — галактики: активные — галактики: ядра

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Источники с пиком в радиоспектрах на гигагерцах (Gigahertz-Peaked spectrum, или GPS) — компактные внегалактические объекты, которые считаются молодыми предшественниками массивных радио-громких галактик (АЯГ — активные ядра галактик) [1–3]. Особенностью GPS является наличие спектрального максимума  $\nu_{\text{int}}$  в радиоспектре<sup>1</sup> в области нескольких гигагерц (в системе отсчета источника). К GPS примыкают два класса объектов со схожими свойствами, отличающиеся областью спектрального максимума: Compact Steep Spectrum (CSS) с  $\nu_{\text{int}} < 0.5$  ГГц и High Frequency Peakers (HFP) с  $\nu_{\text{int}} > 5$  ГГц [4–7]. Указанное разграничение по частоте является условным, так как положение максимума может меняться, поэтому в литературе эти объекты часто упоминаются под общим термином GPS.

Все они отличаются высокой радиосветимостью  $L_{\text{radio}} \sim 10^{43-45}$  эрг с<sup>-1</sup> и компактностью — менее 1 кпк [1] для GPS/HFP и порядка 20 кпк для CSS, низкой переменностью в радиодиапазоне (несколько процентов) и низкой степенью поляризации [1, 8–10].

Считается, что GPS и CSS составляют соответственно 10% и 20% ярких представителей активных ядер галактик (АЯГ). Однако последние исследования на РАТАН-600 обнаружили, что их значительно меньше [11–15].

Завал спектра в оптически толстой области излучения GPS часто объясняется в рамках модели синхротронного самопоглощения (SSA — synchrotron self-absorption), реже — свободно-свободного поглощения (FFA — free-free absorption) [16]. Общепринятой моделью, объясняющей малые размеры таких объектов, является сценарий молодости — объекты молоды и не успели разрастись в крупные структуры [17–22]. Наличие плотной среды, окружающей

\*E-mail: lacerta999@gmail.com

<sup>1</sup>Здесь и далее спектральная плотность потока связана с частотой как  $S_\nu \sim \nu^\alpha$

их центральные области, также может затруднять активное и быстрое расширение [1]. Известная антикорреляция «линейный размер—частота максимума» [2] косвенно указывает на молодой возраст GPS/CSS [20].

Происхождение некоторых GPS (около 10%) объясняют возникновением повторной активности [23, 24], при которой объекты длительное время имеют высокую радиосветимость. Эта гипотеза подтверждается обнаружением вокруг некоторых GPS диффузных областей радиоизлучения, которые могут быть остатками предыдущих периодов активности [23]. Высказывалось [25] и предположение о том, что GPS-кварзары — это блазары, окруженные плотной газопылевой средой. Она может экранировать проявления свойств блазаров при наблюдениях, несмотря на близкое по лучу зрения расположение джета.

Наблюдаемый радиоспектр для GPS-галактик хорошо объясняется эффектами проекции [16]. Для GPS-кварзаров имеется мало готовых сценариев, и выборки значительно «загрязнены» переменными объектами, радиоспектры которых временно инвертированы [26, 27]. GPS-кварзары являются наиболее компактными (от нескольких парсек до нескольких сотен парсек) и имеют сложные структуры с ядром и излучающим джетом. Компактность объясняется ориентацией джета, направленного близко по лучу зрения наблюдателя [16].

Очевидно, что GPS представляют собой разнородную группу внегалактических объектов. Включение значительной доли переменных кварзаров в такие выборки однозначно влияет на результаты при их анализе. Попытка многомерного упорядочивания информации о разносторонних свойствах GPS/HFR объектов [28] выявила множество подгрупп (кластеров), значительно отличающихся по своим характеристикам. В каталог блазаров Roma-BZCAT [29] мотивированно включены все известные GPS-кварзары. В настоящее время установлено, что существует два типа GPS: классические непременные молодые объекты (обозначим их как GPS первого типа — «type 1») и переменные объекты, часто ассоциирующиеся с блазарами (второй тип — «type 2»). Имеется небольшое различие в спектрах: у GPS первого типа — более узкий пик, у второго — как правило, широкий [15, 30]. РСДБ-измерения являются надежным способом разделить такие объекты [31, 32].

GPS рассматриваются как предшественники АЯГ, как ранние стадии их эволюции [1, 2, 7, 10]. Отсюда повышенный интерес к возможной связи GPS с далекими объектами Вселенной [33–38].

Появление высокочувствительных дециметровых (дм) измерений [39–41] способствовало исследованию компактных объектов с максимумом в радиоспектре на частотах менее 1 ГГц (Megahertz-Peaked Spectrum — MPS-объекты). Сегодня MPS выступают как ключевые объекты для альтернативного поиска предельно далеких объектов [33, 36, 38] ( $z > 6$ ), когда спектроскопические измерения красного смещения затруднены из-за множественных линий поглощения Ly- $\alpha$  на фотонах реликта.

Настоящая работа направлена на исследование радиосвойств GPS в широком диапазоне частот (0.075–857 ГГц) на масштабах времени более 10 лет. Проанализированы свойства объектов в зависимости от класса АЯГ. Основу анализа образуют измерения, проведенные на РАТАН-600 (1.1, 2.3, 4.8, 7.7/8.2, 11.2 и 21.7 ГГц) в период 2006–2017 гг. Значительную долю дополнительных измерений составляют данные из системы поддержки астрофизических каталогов CATS [42, 43]. Дополнительно для ярких объектов сделаны оценки верхнего уровня плотностей потоков в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, основанные на анализе изображения карт, полученных в обзоре Planck. Для расчетов использовались космологические константы:  $\Omega_m = 0.27$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.73$ ,  $H = 71 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ .

## 2. СВОЙСТВА ВЫБОРКИ. НАБЛЮДЕНИЯ

В работе исследуются GPS-источники и кандидаты из полной по плотности потока выборки ( $S_{5\text{GHz}} \geq 200 \text{ мЯн}$ ) из работы [15]. В этой работе было отобрано 467 радиоисточников с максимумом в спектре, из них 112 источников рассматривались как GPS по классическим критериям. GPS-объекты и кандидаты из этого списка измерялись на РАТАН-600 в плановой научной программе в 2006–2017 гг. Промежуточные результаты мониторинга в период 2006–2011 гг. опубликованы в работах [12, 13, 15]. Наблюдения проводились на частотах: 1.1, 2.3, 4.8, 7.7/8.2, 11.2 и 21.7 ГГц. Для отбора GPS использовались критерии из работ [1, 44, 45], согласно которым свойства радиоспектра GPS должны соответствовать теоретическому спектру однородного источника синхротронного излучения с самопоглощением на низких частотах. Сюда входят: спектральные индексы оптически толстой и тонкой областей излучения  $\alpha_{\text{below}} = +0.5$  и  $\alpha_{\text{above}} = -0.7$  соответственно [45]; ширина спектра по уровню половинной мощности излучения (full width half maximum)  $FWHM$  — порядка 1.2 декады частоты [1, 46]; индекс переменности  $V_{\text{radio}} \leq 25\%$ . Красные смещения объектов лежат в диапазоне от 0.01 до 4.5 и известны почти для половины из них (рис. 1).

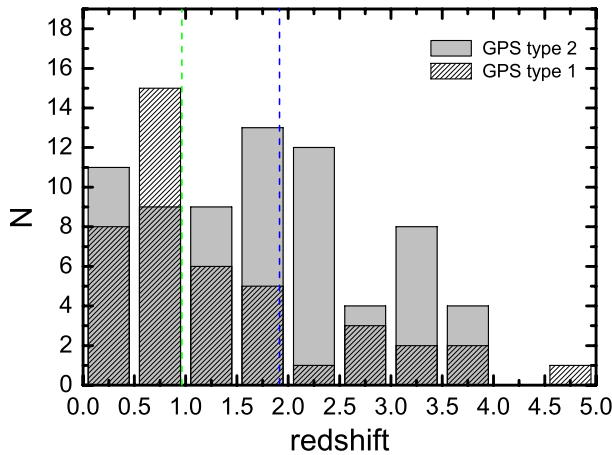


Рис. 1. Распределение GPS-объектов первого и второго типа по красным смещениям. Пунктирной линией отмечены медианные значения  $z$ .

Измерения спектральных плотностей потоков проводились с помощью двух радиометрических комплексов (таблица 1): (1) на частотах 1.28, 2.25, 4.8, 7.7/8.2, 11.2 и 21.7 ГГц на вторичном зеркале №1 (в таблице обозначен как «1»); и (2) трехчастотного комплекса «Эридан» на 4.8, 11.2 и 21.7 ГГц на вторичном зеркале №2 (обозначен как «2»). Все радиометры континуума РАТАН-600 — это приемники прямого усиления СВЧ-сигнала в заданной полосе частот с квадратичным детектированием для получения выходного сигнала. Режим работы всех приемников — «радиометр полной мощности». Сбор данных осуществляется штатной универсальной системой регистрации, основанной на аппаратно-программной подсистеме ER-DAS (Embedded Radiometric Data Acquisition System) [47]. Современный уровень приемной аппаратуры радиотелескопа обеспечивается сверхмалозумящими неохлаждаемыми усилителями на транзисторах с высокой подвижностью электронов (HEMT) и цифровыми сигнальными процессорами в системе регистрации данных.

В наблюдениях использовались двух- и трехзеркальная конфигурации антенны. Угловое разрешение радиотелескопа зависит от высоты установки антенны, и из-за ножевой формы диаграммы направленности по склонению оно в три–четыре раза хуже, чем по прямому восхождению. Предел обнаружения для радиотелескопа — порядка 5 мЯн (за время накопления 3 с) на частоте 4.8 ГГц на средних углах при оптимальных погодных условиях.

Обработка материала производилась при помощи автоматизированной системы обработки наблюдательных данных в континууме РАТАН-600 [48], основанной на модулях штатного пакета FADPS (Flexible Astronomical Data

Таблица 1. Параметры радиометров континуума РАТАН-600

$f$ , ГГц		$\Delta f$ , ГГц		$\Delta S$ , мЯн/луч		$FWHM$ , "	
1	2	1	2	1	2	1	2
21.7	21.7	2.5	2.5	50	95	11	16.5
11.2	11.2	1.4	1.0	15	30	16	23
7.7/8.2	...	1.0	...	10	...	22	...
4.8	4.8	0.6	0.8	5	10	35	53
2.25	...	0.08	...	40	...	80	...
1.28	...	0.06	...	200	...	110	...

Обозначения:  $f$  — центральная частота,  $\Delta f$  — ширина полосы,  $\Delta S$  — предел обнаружения по плотности потока на единицу углового разрешения,  $FWHM$  — полная ширина на уровне половинной амплитуды по прямому восхождению RA.

Processing System) [49] и предназначенной для потоковой интерактивной обработки выходных данных радиометров континуума РАТАН-600. Оценки ошибок измерений и процедура калибровки по плотности потока описаны в работах [12, 13, 48, 50–52]. Информация о калибровочных стандартах взята из работ [53–56].

Общая ошибка измерения спектральной плотности потока определяется ошибкой калибровки и ошибкой определения антенной температуры. Ошибка абсолютной шкалы плотности потока составляет 3–10% на частотах РАТАН-600 и не включена в суммарную ошибку:

$$\left(\frac{\sigma_s}{S_\nu}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_c}{g_\nu(h)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{T_{ant,\nu}}\right)^2. \quad (1)$$

Здесь  $\sigma_s$  — общая стандартная ошибка плотности потока;  $\sigma_c$  — ошибка калибровки по потоку;  $T_{ant,\nu}$  — антенная температура на частоте  $\nu$ ;  $\sigma_t$  — ошибка определения антенной температуры  $T_{ant,\nu}$ ;  $S_\nu$  — спектральная плотность потока;  $g_\nu(h)$  — калибровочный коэффициент, отражающий усредненную за время наблюдательного цикла суммарную зависимость нестабильности атмосферного поглощения и эффективности площади от угла  $h$  над горизонтом (при реальных абберациях из-за поперечного выноса первичных облучателей из электрической оси антенны). Высота установки антенны  $h = 90^\circ - \phi + \delta$ , здесь  $\delta$  — склонение объекта,  $\phi = 43^\circ 653$  — широта места телескопа. Средняя ошибка измерения спектральной плотности потока по выборке составляет: 15% на 21.7 ГГц, 7% на 11.2 ГГц, 6% на 8.2/7.7 ГГц, 5% на 4.8 ГГц, 7% на 2.3 ГГц и 12% на 1.2 ГГц.

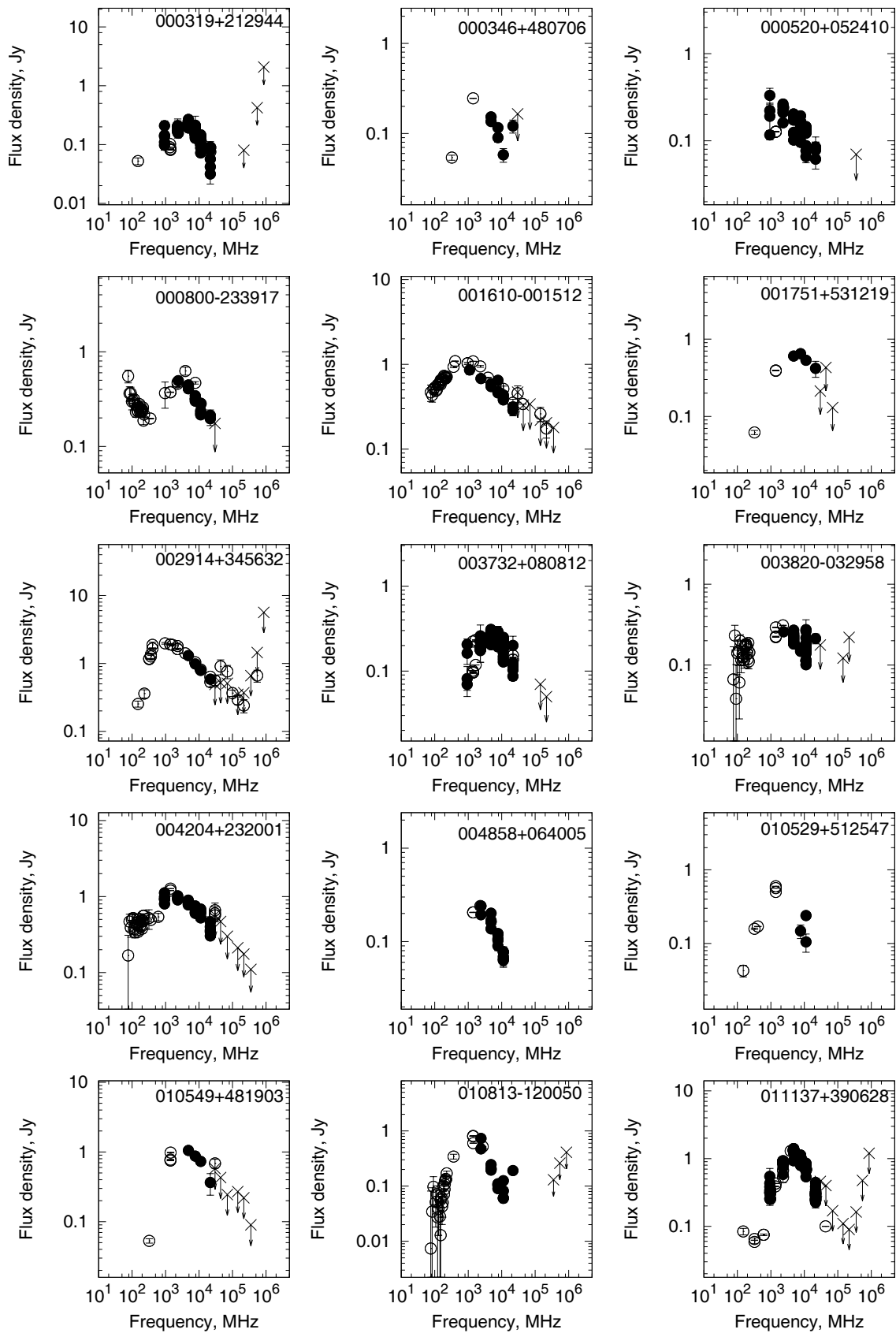


Рис. 2. Континуальные радиоспектры GPS-объектов и кандидатов. Заполненные кружки — измерения ПАТАН-600 в 2006–2017 гг., открытые — архивные данные CATS, крестики — оценки верхнего уровня потока на картах Planck методом [57].

Континуальные радиоспектры отобранных GPS в виде каталога представлены в Дополнительных материалах, на рис. 2 дан его фрагмент. Некоторые из спектров можно проанализировать в интерактивном каталоге измерений PATAH-600 [58]. Оценочные величины плотностей потоков «горячих» пятен (положительного отклика) на картах Planck, совпадающих с координатами источников списка, обозначены на спектре крестиками со стрелками «вниз». Спектры проанализированы с использованием модуля *spg* пакета FADPS.

Результаты измерений объектов в период 2011–2017 гг. приведены в Дополнительных материалах, а также на сайте Центра астрономических данных в Страсбурге (CDS)<sup>2</sup>, фрагмент представлен в таблице 2. Здесь первая колонка — имя объекта из NVSS каталога, колонка (2) — средняя эпоха наблюдений, колонки (3–8) — полученные значения спектральных плотностей потоков и их ошибок на частотах PATAH-600 (указаны сверху).

На основе критериев отбора GPS (см. работы [1, 12, 13, 15, 45]) из общего списка выделено 164 GPS-объекта и кандидата в GPS, сведения о которых приведены в таблице 3. Из них 17 (с пометкой «\*») выявлено впервые. Дополнительно отмечены «\*» еще 30 объектов, которые были впервые определены нами как GPS-кандидаты в работе [15]. В таблице 3 представлена следующая информация:

- (1) — название объекта;
- (2) — тип радиоспектра, в зависимости от положения максимума: CSS, GPS или HFP, для объектов с неизвестным  $z$  — кандидат «g»;
- (3)–(4) — оптический тип и величина красного смещения по данным NED<sup>3</sup> (NASA/IPAC Extragalactic Database);
- (5)–(6) — значения  $\nu_{\text{obs}}$  и  $\nu_{\text{int}}$ ;
- (7)–(8) — спектральные индексы  $\alpha_{\text{below}}$  и  $\alpha_{\text{above}}$ ;
- (9) — спектральный индекс  $\alpha_{353-857}$ ;
- (10) — ширина спектра  $FWHM$ , выраженная в декадах частоты;
- (11) — переменность спектральной плотности потока на частоте 11.2 ГГц (%);
- (12) — морфология [? ?];
- (13) — тип АЯГ по данным Roma-BZCAT<sup>4</sup>.

Звездочками рядом с величинами спектрального индекса  $\alpha_{353-857}$  в колонке (9) отмечены источники, удаленные от «горячих» пятен на картах Planck больше, чем на 2'5 (до 3'5). Часто в этом случае пятна довольно протяженные и яркие и источники находятся на их периферии.

В целом исследуемые объекты — это яркие радиоисточники, со средним медианным значением потока на радиочастотах несколько сотен мЯн (см. таблицу 4). Почти на всех частотах GPS второго типа значительно ярче (рис. 3).

### 3. ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТЕЙ ПОТОКОВ В МИЛЛИМЕТРОВОМ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ

Для построения спектров источников в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах использовались данные обзоров WMAP<sup>5</sup> (23–94 ГГц) [60] и Planck (30–847 ГГц) [61]. По сравнению с WMAP измерения Planck реализованы с более высоким (в три раза) разрешением и чувствительностью (в 10 раз). Наблюдения WMAP и Planck частично или полностью совпадают по времени с программой мониторинга GPS на PATAH-600 (2006–2017 гг.).

Для неярких объектов, при отсутствии измерений Planck, мы делали оценки верхнего уровня плотности потока на «планковских» частотах по методике из работы [57]. Для этого использовались карты компонент микроволнового излучения, полученные со спутника Planck<sup>6</sup>, и каталоги источников Planck, которые размещены в архиве Planck Legacy Archive — PLA<sup>7</sup>.

Существует гипотеза о повышенной вероятности появления положительного отклика («горячих» пятен) на картах микроволнового фона, если в исследуемой области заведомо присутствует радиоагалактика [62]. В работах [57, 63] было показано, что на картах Planck, содержащих сигналы как частотных каналов, так и очищенного СМВ, на уровне ниже  $4\sigma$  регистрируется достаточно большое число точечных внегалактических источников разных спектральных свойств. Для отождествления пятен с исследуемыми объектами и измерения расстояний от источника до центра пятна использовалось программное приложение Aladin [64, 65]. Отбирались пятна, центры которых удалены от источников на расстояния, не превышающие 2'5 на частотах выше 100 ГГц и не более 3'–5' — на частотах ниже 70 ГГц.

Для фотометрического измерения сигнала от пятен использовалась программа Sourse Extractor<sup>8</sup> (SExtractor) [66], с помощью которой получены данные об интегральной яркости пятен на картах

<sup>5</sup><http://lambda.gsfc.nasa.gov>

<sup>6</sup><http://www.rssd.esa.int/Planck/> [61]

<sup>7</sup>[http://www.sciops.esa.int/index.php?project=\planck&page=Planck\\\_Legacy\\\_Archive](http://www.sciops.esa.int/index.php?project=\planck&page=Planck\_Legacy\_Archive)

<sup>8</sup><http://terapix.iap.fr/soft/seextractor>

<sup>2</sup><http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>

<sup>3</sup><https://ned.ipac.caltech.edu/>

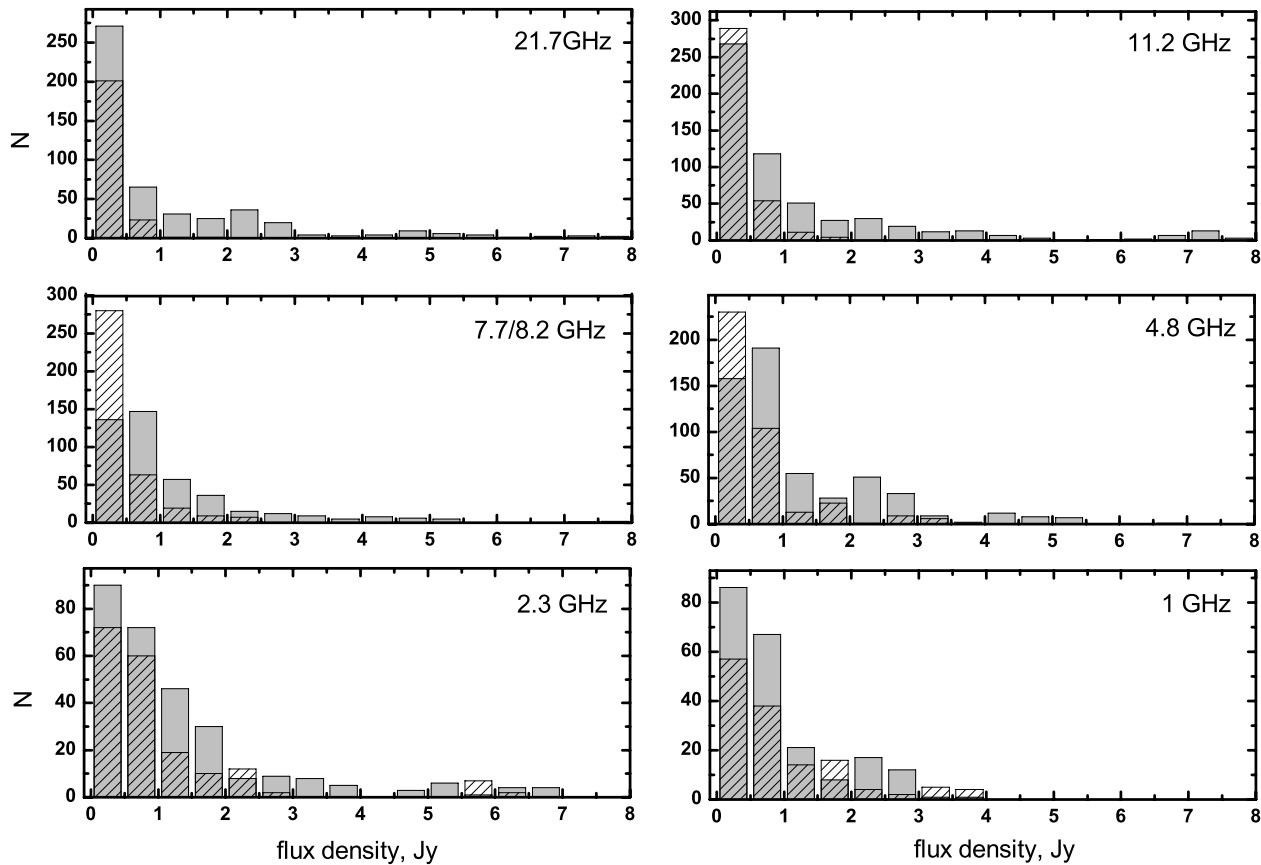
<sup>4</sup><http://www.asdc.asi.it/bzcat/>

Таблица 2. Плотности потоков GPS-объектов по наблюдениям на РАТАН-600 в период 2011–2017 гг. (фрагмент)

Номер NVSS	JD	$S_{21.7}, \sigma, \text{Ян}$	$S_{11.2}, \sigma, \text{Ян}$	$S_{7.7/8.2}, \sigma, \text{Ян}$	$S_{4.8}, \sigma, \text{Ян}$	$S_{2.3}, \sigma, \text{Ян}$	$S_{1/1.3}, \sigma, \text{Ян}$
032957+275615	2457861	$0.196 \pm 0.03$	$0.384 \pm 0.04$	$0.488 \pm 0.04$	$0.686 \pm 0.04$	$1.027 \pm 0.1$	$1.206 \pm 0.10$
034729+200453	2455696		$0.172 \pm 0.02$	$0.259 \pm 0.02$	$0.334 \pm 0.02$		
	2457861	$0.116 \pm 0.02$	$0.175 \pm 0.02$	$0.251 \pm 0.02$	$0.349 \pm 0.02$	$0.354 \pm 0.02$	$0.404 \pm 0.04$
040305+260001	2455696	$1.490 \pm 0.09$	$1.894 \pm 0.05$	$2.194 \pm 0.07$	$2.460 \pm 0.06$		
	2456939	$0.815 \pm 0.10$	$1.044 \pm 0.10$	$1.448 \pm 0.10$	$1.834 \pm 0.10$		
	2457030	$0.856 \pm 0.10$	$1.191 \pm 0.10$	$1.479 \pm 0.10$	$1.663 \pm 0.10$		
	2457831	$0.609 \pm 0.10$	$1.057 \pm 0.10$	$1.306 \pm 0.10$	$1.461 \pm 0.10$	$1.521 \pm 0.02$	$1.395 \pm 0.10$
040922+121739	2456173	$0.193 \pm 0.02$	$0.252 \pm 0.02$	$0.297 \pm 0.02$	$0.358 \pm 0.02$		
	2457860	$0.144 \pm 0.02$	$0.137 \pm 0.01$	$0.157 \pm 0.01$	$0.186 \pm 0.01$	$0.252 \pm 0.02$	$0.370 \pm 0.04$
	2457033	$0.383 \pm 0.05$	$0.280 \pm 0.03$		$0.218 \pm 0.01$		
	2457090	$0.179 \pm 0.02$	$0.219 \pm 0.02$		$0.303 \pm 0.02$		
	2457124		$0.272 \pm 0.03$		$0.250 \pm 0.01$		
	2457214	$0.223 \pm 0.03$	$0.235 \pm 0.02$		$0.248 \pm 0.01$		

Таблица 3. Параметры радиоспектров GPS и GPS-кандидатов по результатам наблюдений 2006–2017 гг. на РАТАН-600 (фрагмент)

Номер NVSS	тип сп.	тип об.	$z$	$\nu_{\text{obs}}, \text{GHz}$	$\nu_{\text{int}}, \text{ГГц}$	$\alpha_{\text{below}}, \sigma$	$\alpha_{\text{above}}, \sigma$	$\alpha_{353-857}$	$FWHM$	$V ar_{11.2}, \%$	морф.	тип AGN
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
000319+212944	GPS	QSO	0.45	2.3	3.3	$0.429 \pm 0.006$	$-0.948 \pm 0.013$	$2.7 \pm 1.3^*$	1.5	3.0	cso	FSRQ
000346+480703		–	–	1.9	–	$1.037 \pm 0.1$	$-1.004 \pm 0.023$		1.3	–	cd	–
000520+052410	HFP	QSO	1.89	2.0	5.7	$0.189 \pm 0.027$	$-0.473 \pm 0.010$		1.8	25.0	cso	FSRQ
000800–233917*	HFP	QSO	1.41	3.4	8.1	$0.450 \pm 0.004$	$-0.550 \pm 0.007$		1.6	3.4	–	FSRQ
001610–001512	GPS	–	1.57	0.9	2.3	$0.488 \pm 0.003$	$-0.309 \pm 0.002$		2.0	–	–	FSRQ



**Рис. 3.** Распределение GPS-объектов первого (заштрихованным) и второго (серым) типа по спектральным плотностям потоков, полученным на РАТАН-600 на частотах 1–21.7 ГГц. Несколько объектов с плотностями потоков больше 8 Ян исключены.

**Таблица 4.** Медианные значения плотностей потоков GPS первого и второго типа, полученные на шести частотах РАТАН-600

GPS	$S_{21.7}$ Ян	$S_{11.2}$ Ян	$S_{8.2}$ Ян	$S_{4.8}$ Ян	$S_{2.3}$ Ян	$S_{1.1}$ Ян
type 1	0.19	0.21	0.28	0.41	0.66	0.62
type 2	0.42	0.58	0.72	0.84	0.87	0.61

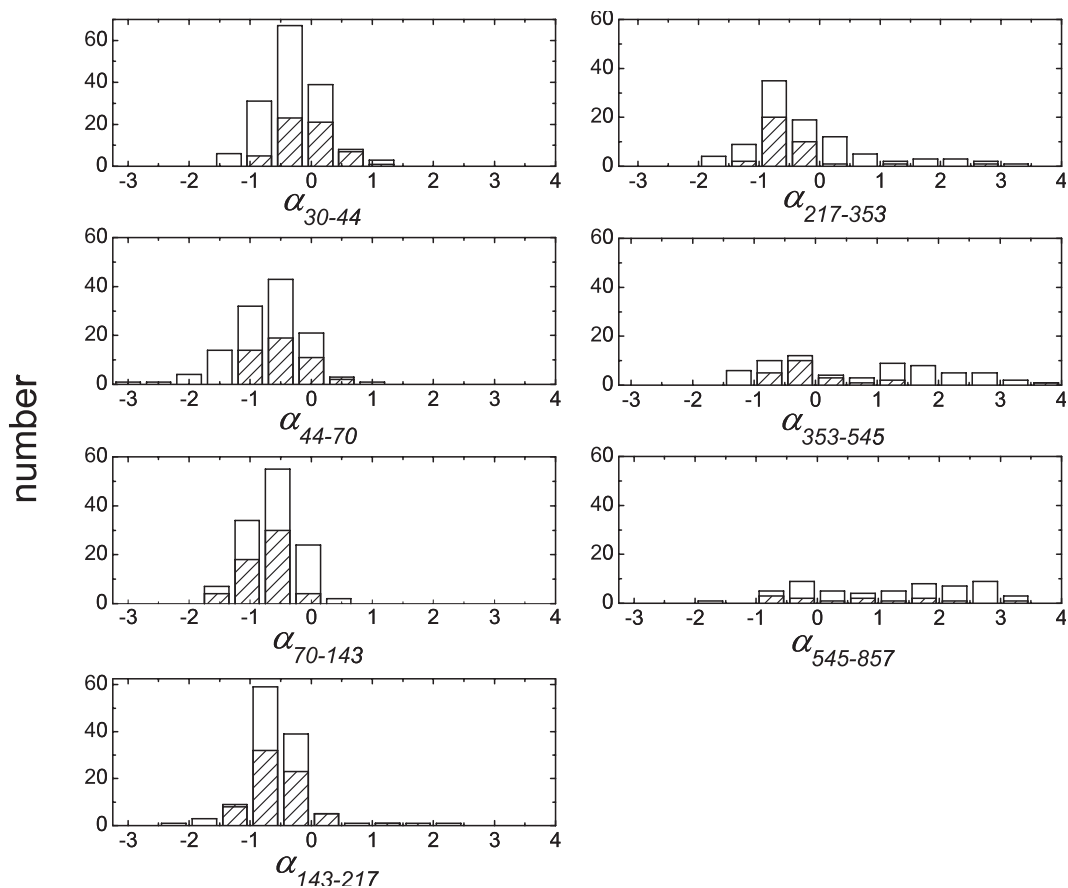
Planck. Полученные яркостные температуры переводились в плотности потоков с помощью калибровочных кривых [57], связывающих плотности потоков источников (в Ян) с температурой микроволнового фона на картах Planck (в градусах Кельвина).

В настоящей работе мы повторили процедуру определения калибровочных кривых, используя в качестве калибраторов объекты из списков [13, 15], для которых измерены плотности потоков в каталоге Planck. Для контроля работы методики проведено сравнение плотностей потоков, полученных с ее помощью, с плотностями потоков из каталога

Planck для источников, у которых такие данные имеются. Величины среднего  $\bar{r}$  и среднеквадратичного отклонения от среднего  $\sigma_r$  отношений плотностей потоков, полученных с помощью данной методики, к их плотностям потоков, приведенным в каталоге Planck, по выборке калибраторов из списков [13, 15] лежат в диапазонах  $\bar{r} = 0.97–1.05$  и  $\sigma_r = 0.2–0.4$ , в зависимости от частоты.

Полученные верхние пределы плотностей потоков пятен на картах Planck, располагающихся вблизи GPS-источников, также включены в спектры объектов (рис. 2, стрелки вниз). Мы рассчитали двухчастотные спектральные индексы и построили их распределения. Гистограммы приведены на рис. 4. Заштрихованные области представляют распределения индексов только по измерениям Planck, белые — по всем данным, включая и прямые измерения из каталога Planck, и оценочные значения потоков «горячих» пятен на картах микроволнового излучения, совпадающие с координатами источников.

Характер распределений спектральных индексов  $\alpha_{30–44}$ ,  $\alpha_{44–70}$ ,  $\alpha_{70–143}$  и  $\alpha_{143–217}$ , построенных и на основании оценок верхних уровней потока, и



**Рис. 4.** Гистограммы распределения двухчастотных спектральных индексов  $\alpha$ , полученных по измерениям плотностей потоков каталога Planck (заштрихованным), и двухчастотных спектральных индексов, рассчитанных нами по всей совокупности данных, включая измерения Planck и наши оценки верхнего уровня потока (белым). Нижний индекс у  $\alpha$  обозначает диапазон частот, в котором двухчастотный спектральный индекс был рассчитан.

на основании данных каталога Planck, идентичен. Он хорошо согласуется с результатами, полученными по двум релизам каталога Planck [67–69]. Так, в поведении распределений спектральных индексов, приведенных в работах [67, 68] и полученных нами (от  $\alpha_{30-44}$  к  $\alpha_{143-217}$ ), наблюдается заметный сдвиг гистограмм с сторону более низких величин  $\alpha$ , что связано с укрупнением спектральных индексов источников. Такое распределение  $\alpha$  на низких частотах обусловлено доминированием источников с синхротронным излучением.

Гистограммы распределений  $\alpha_{217-353}$  отличаются от приведенных в работах [67, 68]. Большинство источников нашего списка, включая и те, что имеют данные о плотностях потоков в каталоге Planck, имеют спектральный индекс в диапазоне  $-2 < \alpha_{217-353} < 1$ , что также подтверждает преобладание источников с синхротронным излучением. При переходе к частотам выше 217 ГГц у незначительной части GPS наблюдается подъем спектра на 353–857 ГГц, а двухчастотные спектральные индексы  $\alpha_{545-857}$  и  $\alpha_{353-545}$  оказываются больше +1. Такие источники по классификации [69]

можно отнести к объектам «промежуточного синхротронного» типа. Это источники, у которых регистрируется сигнал на частотах 545 ГГц и 857 ГГц и имеется как сильный синхротронный компонент, так и значительный компонент пыли. Объекты такого типа обнаруживались, например, при исследовании спектров внегалактических источников в работе [70].

Среди источников, которые анализировались в работе [69], менее 10% классифицировались как «промежуточные». Их доля значительно возросла, если снимали ограничение на полноту выборки по высокому уровню фотометрического шума в сигнале, включая в рассмотрение источники с более низкими плотностями потоков.

Если ограничиться распределениями двухчастотных спектров, построенных только по данным каталога Planck с порогом обнаружения свыше  $4\sigma$  (рис. 4, заштрихованные бары), то эта выборка состоит практически из чисто «синхротронных», объектов. Из 10 объектов, имеющих данные на 857 ГГц в каталоге Planck, только у четырех спектральный



индекс  $\alpha_{545-857} > 1$ , что составляет около 8% рассматриваемой выборки. Снижение порога обнаружения до примерно  $1-3\sigma$  приводит к увеличению числа объектов, вблизи которых имеются пятна на картах Planck на частотах 545 ГГц и 857 ГГц.

Подъем спектров на высоких частотах может быть вызван наличием на картах Planck сигнала от холодной галактической пыли, хотя нельзя исключить и вклад собственной внутренней пыли источников. Поскольку спектральные индексы  $\alpha_{353-857}$  получены на основе оценочных данных, мы не можем сделать более конкретные выводы.

#### 4. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Перечень дополнительных измерений из базы CATS приведен в таблице 5 в виде списка каталогов. Преимущественно использовались низкочастотные измерения и многочастотные одновременные измерения. На низких частотах использовались измерения обзора GLEAM, который проводился в 2013–2014 гг. [40] в полосе 72–231 МГц на 20 частотах с угловым разрешением  $2'$  и порогом обнаружения 50 мЯн. В анализ включены и измерения обзора TGSS, который проводится на индийском радиотелескопе GMRT (Giant Metrewave Radio Telescope) на частоте 150 МГц [39]. Первый релиз данных TGSS ADR1 (Alternative Data Release) [39] получен по наблюдениям 2010–2012 гг. В каталог включено 620 тысяч объектов при пороге обнаружения  $7\sigma$  и угловом разрешении  $2''$ . Оба каталога дополняют спектральную информацию об объектах на частотах, ниже 1.1 ГГц. Кроме того, в анализ включены и низкочастотные измерения, использованные в работе [13].

Дополнительные низко- и высокочастотные измерения позволили уточнить форму радиоспектров и провести более надежную классификацию по типу спектра. Были выделены все три подкласса компактных объектов: CSS, GPS и HFP (Таблица 3).

#### 5. АНАЛИЗ РАДИОСПЕКТРОВ GPS

В результате анализа комбинированных радиоспектров объектов уточнены следующие их параметры: частота максимума в системе отсчета наблюдателя  $\nu_{\text{obs}}$  и источника  $\nu_{\text{int}}$ ; спектральный индекс оптически толстой и оптически тонкой областей излучения  $\alpha_{\text{below}}$  и  $\alpha_{\text{above}}$ ; полуширина спектров  $FWHM$  (выраженная в декадах частоты); индекс переменности  $V_{\text{radio}}$  [13, 15].

Классификация объектов по типу спектра, типу АЯГ и морфологии приведена в таблице 6.

**Таблица 5.** Основные каталоги с дополнительными измерениями (CATS)

Каталог	Частота, МГц	Ссылка
GLEAM	72–231	[40]
VLSS	74	[71]
TGSS	150	[39]
TXS	365	[72]
Kuehr	318–750	[73]
PKS90	80–2700	[74]
WENSS	325	[75]
MIYUN	232	[76]
WISH	352	[77]
MRC	408	[78]
NAIC	611	[79]
GPSDa	1365, 1665	[80]
GPSTi	1365, 1665, 2300	[10]
GPSSt	325, 608, 1380, 1630, 2300, 2695	[81]
NVSS	1400	[82]
QORG	1400	[83]
MSL	1415, 2700	[84]
PKSFL	2300, 2700	[85]
VCS	2300	[86–88]
KOV97	1000–21 700	[89]
NCPMi	1100–21 700	[50]
	1100–21 700	[51, 52]
GPSRa	1100–21 700	[13]
SRCAT	1000–21 700	CATS
SRCKi	960–21 700	[90]
WMAP	22 000–94 000	[60]
PCCS1	30 000–857 000	[61]
	30 000–857 000	[70]
VLAC	43 000	[91]

Около 40% объектов являются GPS второго типа [29], с максимумом в спектре преимущественно на частотах  $\nu_{\text{int}} > 5$  ГГц (HFP). Информация о РСДБ-морфологии имеется для трети объектов, в основном это объекты типа ‘cso’ (compact

**Таблица 6.** Общая классификация объектов выборки (подробнее см. в тексте)

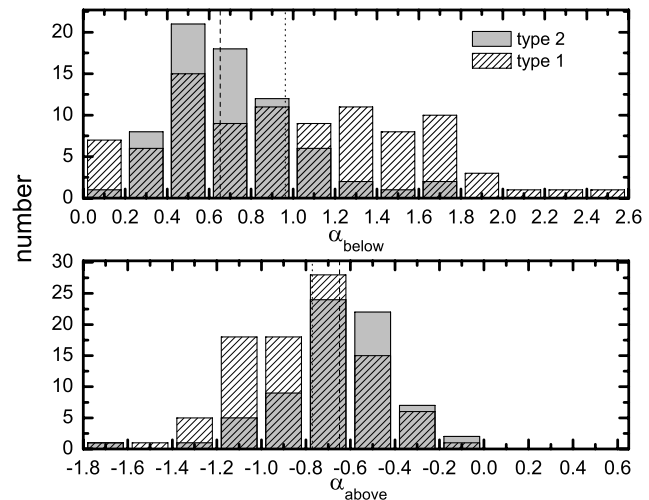
Сп. тип	N	GPS		Морфология			
		type 1	type 2	cso	cj	un	cd
HFP	71	14	57	10	6	11	—
$\nu_{\text{int}} > 5 \text{ ГГц}$							
GPS	40	27	13	8	3	1	7
$0.5 \geq \nu_{\text{int}} \geq 5 \text{ ГГц}$							
CSS	2	2	—	—	1	—	—
$\nu_{\text{int}} < 0.5 \text{ ГГц}$							
неопред.	51	50	1	4	2	1	2
Всего	164	93	71	22	12	13	9

symmetric object), ‘core-jet’, ‘cd’ (compact double) и неразрешенные на масштабах миллисекунд дуги структуры ‘un’.

### 5.1. Спектральные индексы

На рис. 5 представлены распределения GPS по спектральным индексам:  $\alpha_{\text{below}}$  и  $\alpha_{\text{above}}$ : заштрихованным — для «type 1», серым сплошным — для «type 2». Подвыборки этих типов не принадлежат одному распределению (таблица 7) по величинам спектральных индексов согласно критерию Краскела–Уоллиса ( $p < 0.005$ ). GPS второго типа имеют статистически более плоские спектры в оптически толстой и тонкой областях излучения, что обычно рассматривается в рамках стандартного предположения о дополнительных компактных компонентах синхротронного излучения [30]. Для GPS первого типа распределение величин  $\alpha_{\text{below}}$  и  $\alpha_{\text{above}}$  имеет более широкий вид и может отображать более разнообразные свойства излучающей среды в них или разнородный состав выборки.

Имеются статистические различия в распределениях всех измеряемых величин для GPS первого и второго типа ( $z$ ,  $\nu_{\text{obs}}$ ,  $\nu_{\text{int}}$ ,  $FWHM$ , угловые размеры  $\theta$ , радиосветимость  $L_{5\text{GHz}}$ ). Среднее значение  $\alpha_{\text{below}}$  для всех исследуемых типов значительно отличается от теоретического предела для однородного источника синхротронного излучения  $\alpha_{\text{below}} = 2.5$ , что неоднократно подтверждалось наблюдениями [92]. Всего у 5 объектов измеренный спектральный индекс  $\alpha_{\text{below}}$  порядка 2 и более (таблица 8). С уверенностью можно сказать о надежности этого значения для галактики 1447–34 из-за большого количества данных и низкой переменности объекта по оценкам измерений РТАН-600 [13, 15].



**Рис. 5.** Распределение высоко- ( $\alpha_{\text{above}}$ ) и низкочастотных ( $\alpha_{\text{below}}$ ) спектральных индексов GPS. Статистически GPS второго типа (серым сплошным) имеют более плоские спектры и до и после максимума. Пунктирной и штриховой линиями показаны медианные значения спектральных индексов для GPS первого и второго типа соответственно

Для 32 GPS получены ультракрутые спектры (таблица 9),  $\alpha_{\text{above}} < -1$ . Для 11 из них красные смещения не определены, у пяти оно превышает 3. Всего в выборке 17 объектов с  $z > 3$ . Обнаружен статистически незначимый слабый линейный тренд укручения спектра с ростом красного смещения для GPS обоих типов (рис. 6). На рисунке для сравнения представлены измерения для 108 галактик из работы [93]. Здесь все галактики являются кандидатами в USS-объекты (ultra-steep spectrum,  $\alpha_{150-5000\text{МГц}} < -1$ ). Черной и серой пунктирными линиями обозначены прямые аппроксимации данных. В работе [93] выявлена статистически значимая корреляция величин, которая говорит в пользу предположений о том, что поиск объектов с ультракрутыми спектрами может выступать эффективным методом обнаружения далеких галактик ( $z > 3$ ).

Разбив исходную выборку на бины по красному смещению  $\Delta z = 0.2$ , мы определили медианное значение  $\alpha_{\text{above}}$  в каждом бине (рис. 6b) и обнаружили статистически значимую корреляцию ( $k_{sp} = -0.59$ ,  $p < 0.005$ ), показывающую укручение среднего спектрального индекса с ростом  $z$  в заданных космологических интервалах.

### 5.2. Полуширина спектра $FWHM$

Одним из критериев отбора GPS служит величина ширины спектра по уровню половинной мощности  $FWHM$ , выраженная в декадах частоты. В работах [1, 45, 46] для классического случая ее принимают равной 1.2. В измерениях,

Таблица 7. Некоторые параметры GPS первого и второго типа (средние значения)

Тип	$N$	$z$	$\alpha_{\text{below}}$	$\alpha_{\text{above}}$	$\nu_{\text{int}}$ , ГГц	$FWHM$	$\theta$ , mas	$L_{5\text{GHz}} \times 10^{43}$ , эрг $\text{с}^{-1}$
type 1	93	1.3	+0.99 (0.5)	-0.80 (0.3)	4.3 (0.6)	1.4	2.2 (0.6)	14 (3.2)
type 2	71	1.8	+0.71 (0.2)	-0.66 (0.2)	14.1 (1.4)	1.5	0.6 (0.2)	56 (13.5)

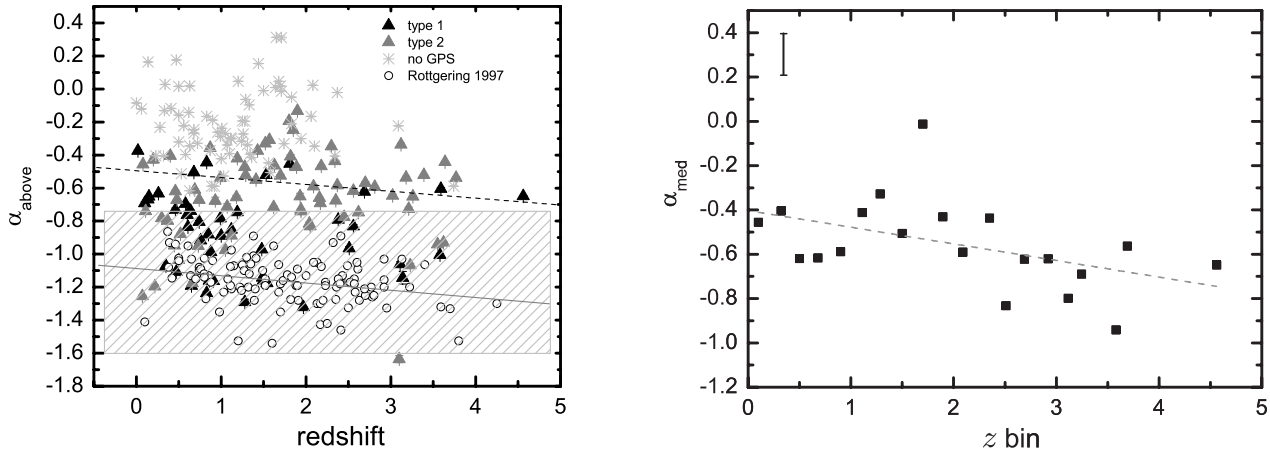


Рис. 6. (а) Соотношение « $z - \alpha_{\text{above}}$ » для всех объектов исходной выборки (треугольники и звездочки); дополнительно наложены галактики из работы [93] (кружки); штриховая и сплошная линии — линейные интерполяции соотношений в настоящей работе и в [93]. (б) То же, при бинировании с  $\Delta z = 0.2$ ; значение  $\alpha_{\text{above}}$  рассчитано как медианное значение в заданном бине красных смещений.

Таблица 8. Объекты с  $\alpha_{\text{below}}$  порядка 2 и более

Назв.	$z$	$\alpha_{\text{above}}$	Опт. тип
0029-34	—	+2.1 (0.02)	—
0806-29	—	+1.9 (0.01)	—
1447-34	0.85	+2.5 (0.04)	G
1845+35	0.76	+2.2 (0.04)	G
2330+31	—	+1.8 (0.01)	—

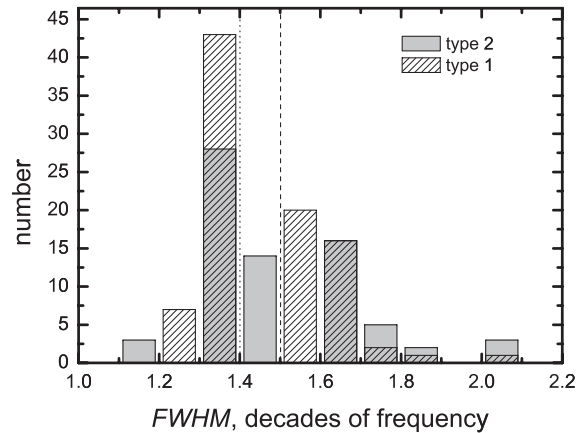


Рис. 7. Распределение GPS обоих типов по ширине спектра по уровню половины мощности  $FWHM$ . Пунктирной и штриховой линиями показаны медианные значения  $FWHM$  для «type 1» и «type 2».

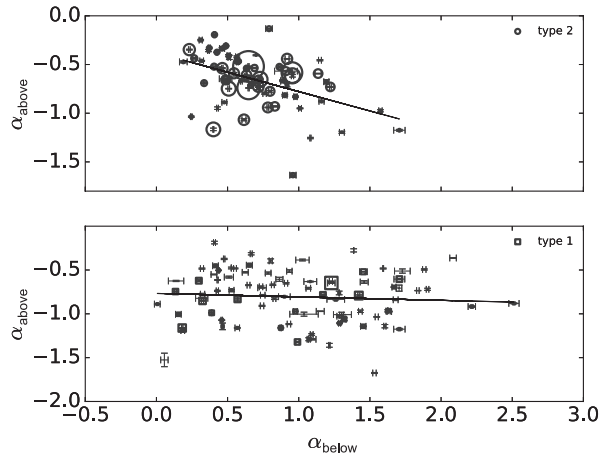
однако, среднее значение  $FWHM$  всегда больше 1.2 [13, 15]. Для исследуемого списка получено среднее значение  $FWHM = 1.5$  для GPS второго типа, что несколько больше (шире), чем для первого (рис. 7), равного 1.4 декады частоты.

Значение величины  $FWHM$  связано с крутизной спектра и с особенностями плоской его части, где  $\alpha \sim 0$ . Для некоторых объектов эта часть достаточно широкая, как, например, у блазара 2022+61, или наоборот, очень узкая (1340+37) (см. каталог спектров). Широкий спектр часто связан с переменностью радиоизлучения, в этом случае мы наблюдаем суперпозиции нескольких меняющихся во времени радиоспектров. Такие спектры чаще встречается у блазаров. Наличие нескольких ком-

пактных компонент играет также определяющую роль. Узкий спектр наблюдается и при недостатке измерений. Для проверки согласованности наклонов спектра с его шириной было построено соотношение величин  $\alpha_{\text{below}}$  и  $\alpha_{\text{above}}$ : для GPS второго типа получен статистически значимый линейный (рис. 8) тренд с коэффициентом регрессии

**Таблица 9.** Объекты с ультракраткими спектрами ( $\alpha_{\text{above}} < -1$ )

Имя	$z$	$\alpha_{\text{above}}$	Опт./AGN тип
0003+48	—	-1.0 (0.02)	—
0048+06	3.58	-1.0 (0.01)	QSO
0108-12	1.54	-1.2 (0.01)	G
0111+39	0.7	-1.2 (0.01)	G/Blazar.un.type
0204+09	—	-1.1 (0.01)	—
0210-22	1.49	-1.1 (0.01)	G
0318+16	0.91	-1.2 (0.01)	QSO
0557+24	3.2	-1.1 (0.01)	FSRQ
0906+03	0.83	-1.2 (0.01)	G
1009+06	—	-1.3 (0.01)	—
1122-27	0.65	-1.2 (0.01)	—
1227+36	1.97	-1.3 (0.01)	QSO
1237+20	—	-1.0 (0.01)	—
1340+37	3.11	-1.1 (0.02)	QSO
1407+28	0.07	-1.3 (0.01)	QSO/BLac
1555-25	—	-1.5 (0.08)	—
1600-00	—	-1.7 (0.04)	—
1609+26	0.47	-1.1 (0.01)	G
1753+27	0.86	-1.2 (0.01)	G
1819-02	—	-1.0 (0.01)	—
1826+27	—	-1.1 (0.01)	—
1929+23	—	-1.4 (0.02)	—
2022+61	0.2	-1.2 (0.01)	FSRQ
2052+36	0.35	-1.1 (0.02)	G
2131-12	0.5	-1.1 (0.01)	FSRQ
2139+14	2.4	-1.2 (0.02)	FSRQ
2143+33	—	-1.1 (0.02)	—
2148+02	—	-1.0 (0.03)	—
2208+18	3.14	-1.1 (0.04)	QSO
2237-25	1.28	-1.3 (0.02)	G
2316-33	3.1	-1.6 (0.04)	QSO
2325-03	1.5	-1.2 (0.01)	G



**Рис. 8.** Соотношение между величинами спектральных индексов  $\alpha_{\text{below}}$  и  $\alpha_{\text{above}}$  для GPS объектов обоих типов. Размеры значков соответствуют величине радиосветимости  $L_{5\text{GHz}}$ .

$k = -0.4$  ( $p < 0.005$ ). Для остальных объектов не наблюдается такой зависимости.

### 5.3. Оценка угловых размеров

Угловые размеры излучающих областей определялись из соотношения [44, 94]:

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

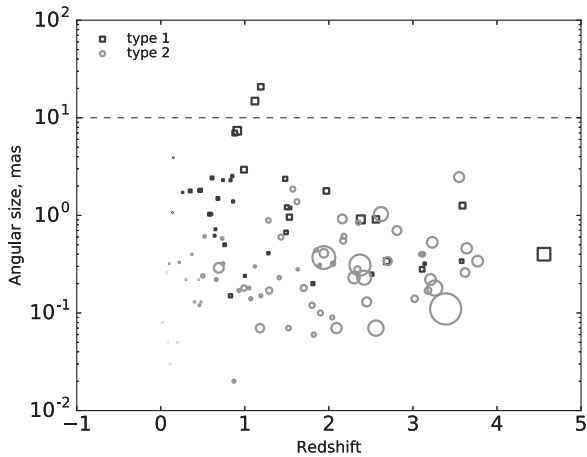
Отсюда

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

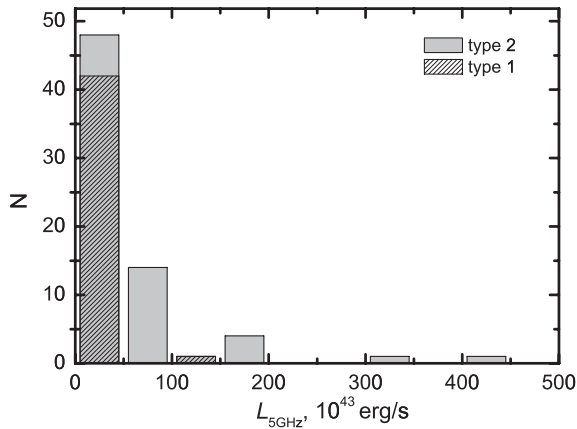
где  $B$  — магнитное поле в гауссах (для компактных внегалактических объектов с однородным распределением магнитного поля и релятивистских частиц принимается  $100 \mu\text{G}$  [95]),  $S_{\text{max}}$  — значение плотности потока в максимуме радиоспектра в Ян,  $\theta$  — угловой размер в мас и  $\nu_{\text{max}}$  — наблюдаемая частота максимума в ГГц.

Оценки размеров делаются в предположении однородного по структуре и магнитному полю радиоисточника со степенным распределением излучающих частиц и самопоглощением на частотах ниже  $\nu_{\text{obs}}$ . В случае, когда источник является точечным для диаграммы направленности, регистрируемое излучение является суммой излучения компонентов источника. Поэтому формула (2) дает оценку угловых размеров верхнего предела области излучения. В целом по выборке величина  $\theta$  не превышает 10 мас (рис. 9). На рис. 10 видно, что яркие по светимости GPS второго типа (среднее значение  $L_{5\text{GHz}} \sim 56 \times 10^{43} \text{ эрг с}^{-1}$ ) имеют статистически более компактные размеры (0.6 мас).

Частота максимума в системе отсчета источника,  $\nu_{\text{int}}$ , связана с частотой максимума в системе



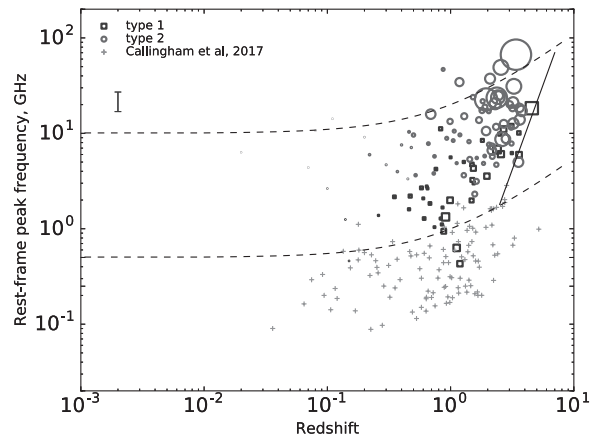
**Рис. 9.** Размеры излучающих областей  $\theta$  для GPS первого (квадраты) и второго (кружки) типа на разных красных смещениях. Размеры значков соответствуют величине радиосветимости  $L_{5\text{GHz}}$ .



**Рис. 10.** Распределение GPS первого (заштрихованным) и второго (серым) типов по радиосветимостям  $L_{5\text{GHz}}$ .

отсчета наблюдателя как  $\nu_{\text{int}} = \nu_{\text{obs}}(1 + z)$ . Дополнительные измерения, используемые в работе, дают возможность расширить область значений  $\nu_{\text{int}}$  и проанализировать соотношение « $z-\nu_{\text{int}}$ » (рис. 11).

Оно хорошо согласуется с тем, что было показано ранее, например, в работах [9, 45], расширяя диапазон значений  $\nu_{\text{int}}$  от 0.2 до 20 ГГц. На красных смещениях  $z > 2$  наблюдается недостаток объектов с малыми значениями  $\nu_{\text{int}}$  меньше чем 1 ГГц. Здесь сплошная линия соответствует минимальному значению  $\nu_{\text{int}}$  в выборке на определенном красном смещении. Для сравнения на рисунке приведены значения  $\nu_{\text{int}}$  из низкочастотного (0.74–210 МГц) обзора GLEAM [41]. Начиная с  $z > 2$ , в нашей выборке доминируют HFR-объекты ( $\nu_{\text{int}} > 5$  ГГц). В выборке GLEAM (110 источников) для такого диапазона красных смещений насчитывается 6 источников со значе-



**Рис. 11.** Соотношение между красным смещением и собственной частотой максимума в спектре  $\nu_{\text{int}}$  для GPS первого (квадраты) и второго (кружки) типа. Размеры значков соответствуют величине радиосветимости  $L_{5\text{GHz}}$ . Штриховыми линиями показаны кривые эволюции собственной частоты максимума для  $\nu_{\text{int}} = 0.5$  и 10 ГГц; сплошная линия соответствует минимальной частоте  $\nu_{\text{int}}$  на определенном красном смещении. Крестиками обозначены данные из выборки сравнения из низкочастотного обзора GLEAM [41].

ниями  $\nu_{\text{int}}$  от 0.2 до 1 ГГц. Известная антикорреляция [2] величин  $\theta-\nu_{\text{int}}$  приведена на рис. 12. Наблюдается линейная связь между этими величинами в логарифмическом масштабе:

$$\lg \nu_{\text{int}} = 0.56(\pm 0.03) - 0.68(\pm 0.01) \lg \theta \quad (4)$$

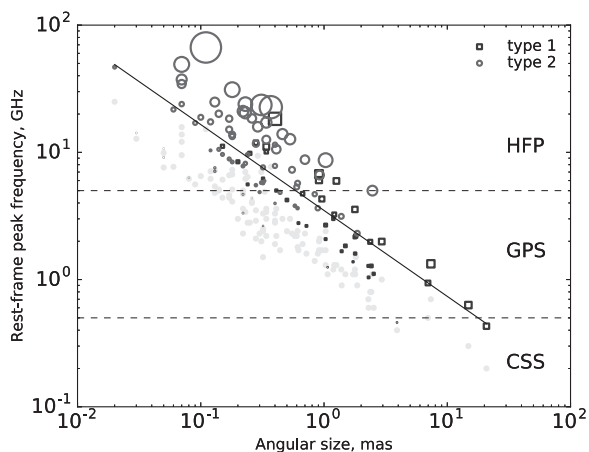
или  $\nu_{\text{int}} \simeq \theta^{-0.68}$ .

Выявлена значимая антикорреляция для всей выборки ( $k = -0.8$ ,  $p < 0.005$ ), высокая для GPS первого типа ( $k = -0.86$ ,  $p < 0.005$ ), и немного меньше для второго ( $k = -0.63$ ,  $p < 0.005$ ). Простая зависимость между механизмом оборота частоты и угловым размером на рис. 12 выглядит непрерывной для всех интервалов значений  $\nu_{\text{int}}$  и радиосветимости  $L_{5\text{GHz}}$ .

Существующая антикорреляция часто предполагает наличие эволюционной связи между HFR, GPS и CSS [2, 20]. Молодые яркие компактные объекты имеют спектральный максимум на высоких радиочастотах; в ходе эволюции они расширяются, спектральный пик смещается в область низких частот, светимость уменьшается («отрицательная эволюция светимости» [96]). Интересным является наличие компактных объектов низкой светимости с высокочастотным максимумом. Это факт говорит о том, что исходная светимость играет определяющую роль в морфологической эволюции внегалактических структур.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Многочастотное исследование полной выборки GPS в радиодиапазоне показало, что этот морфологический тип АЯГ действительно объединяет



**Рис. 12.** Соотношение между угловыми размерами излучающих областей и собственной частотой максимума « $\theta-\nu_{\text{int}}$ » для GPS первого (квадраты) и второго (кружки) типа. Серыми кружками показано соотношение « $\theta-\nu_{\text{obs}}$ » для всей выборки. Черная линия отображает линейную регрессию антикорреляции, которая представлена в логарифмическом масштабе как  $\nu_{\text{int}} \simeq \theta^{-0.68}$ . Штриховыми линиями показаны частоты  $\nu_{\text{int}}$ , равные 0.5 и 10 ГГц. Размеры значков соответствуют величине радиосветимости  $L_{5\text{GHz}}$ .

разнородную группу компактных внегалактических объектов [30]. В общем их можно разделить на две большие группы. Первая связана с классическими представителями GPS и включает молодые объекты с низкой переменностью. Вторая связана с «джетовыми» объектами, в основном, блазарами [30]. Результаты настоящей работы выявили, что GPS первого типа встречаются намного реже, чем предполагалось ранее [1, 9], и их доля в выборках ярких радиисточников составляет менее 2%. Исследуемая выборка содержит значительную долю GPS второго типа — порядка 40%.

Одновременные многочастотные измерения GPS, проведенные на одном инструменте в долговременный период, позволили исключить влияние эффектов, связанных с переменностью объектов. Почти треть объектов начальной выборки продемонстрировала активность в радиодиапазоне на длительных временных масштабах ( $Var_{\text{radio}} > 35\%$ ). У многих объектов зарегистрированы длительные периоды относительно спокойного поведения. Сильные изменения, превышающие уровень 50% минимального потока, носят характер редких и нерегулярных всплесков.

Исследуемые GPS являются яркими радиисточниками — средняя радиосветимость выборки — порядка  $10^{43-44}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ , среднее значение для GPS первого типа равно  $1.4 \times 10^{44}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ , а для второго типа —  $5.6 \times 10^{44}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ .

Статистические отличия в распределении спектральных величин для GPS двух типов выявля-

ют разнообразие условий среды распространения радиоизлучения. В целом GPS второго типа имеют более узкие распределения всех спектральных параметров, образуя более однородную выборку с общим влиянием релятивистских эффектов. Для GPS первого типа характер распределения спектральных величин выявляет выборку неоднородных по морфологии объектов. Результат согласуется с работами [28, 97], в которых алгоритмы кластеризации свойств GPS не выявили их определенную морфологическую классификацию.

Для большей части GPS значение спектральных индексов оптически толстой области излучения  $\alpha_{\text{below}}$  далеко от теоретического предела 2.5 [98]: средние значения для GPS первого и второго типа достигают +0.99 и +0.71 соответственно. Такие величины спектрального индекса являются проявлением работы механизма самопоглощения в релятивистском электронном газе. Обнаружено три источника, которые имеют спектральный индекс оптически толстой области излучения  $\alpha_{\text{below}} \geq 2$ : J1447–34 (2.5), J0029–34 (2.1) и J1845+35 (2.2).

Полученная линейная регрессия « $\theta-\nu_{\text{int}}$ » хорошо согласуется с результатами ряда работ, например, [2, 9, 59], где соотношение между размерами и внутренней частотой максимума выглядит как  $\nu_{\text{int}} \simeq \theta^{-0.59}$ . GPS второго типа связаны массово с HFP и локализованы в области более компактных размеров и высоких пиковых частот. Особый интерес могут представлять GPS низкой радиосветимости, которые массово для нашей выборки связаны с GPS первого типа и должны быть объектами высокочувствительных многочастотных обзоров. Среди обоих типов GPS присутствуют объекты малых угловых размеров с высокими значениями  $\nu_{\text{int}} > 5$  ГГц и низкой радиосветимостью ( $10^{40-42}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ ).

Исследование и моделирование морфологической эволюции радиисточников [99–101] дает несколько сценариев развития соотношения между размерами и светимостью внегалактических объектов. За основу эволюционных различий принимаются начальные условия: особенности среды и характер активности джета (постоянный, прерывающийся, повторный). Отсюда следует, что простой сценарий «молодости» не всегда очевиден, а является одним из возможных вариантов.

В некоторых работах [15, 45] выявлен дефицит GPS-объектов на больших красных смещениях со спектральным максимумом меньше 1 ГГц. В настоящем исследовании, несмотря на привлечение новых низкочастотных измерений, дефицит очевиден (см. рис. 11). Сравнение соотношения « $z-\nu_{\text{int}}$ » для исследуемой выборки и для выборки 110 объектов обзора GLEAM [41] выявило общее сходство в

области красных смещений  $z > 2$ : в обоих случаях резко уменьшается число объектов с  $\nu_{\text{int}} < 1$  ГГц. Отсутствие крупномасштабных компонент синхротронного излучения на ранних эпохах существования Вселенной рассматривается как одна из возможных причин такого дефицита [45].

В общем, GPS первого типа менее яркие, чем второго, поэтому среднее красное смещение для них по выборке меньше, меньше и их вклад в распределение « $z-\nu_{\text{int}}$ » на больших  $z$ . С другой стороны, для второго типа GPS на больших  $z$  мы также наблюдаем резкий обрыв объектов с низкочастотными пиками.

Обнаружено статистическое укрупнение радиоспектров объектов с ростом  $z$ . Подобная корреляция считается ожидаемой для далеких галактик и неоднократно обнаруживалась и обсуждалась [1, 35, 37, 102]. Сравнительный анализ между объектами нашей выборки и выборки 108 USS-галактик (ultra-steep spectrum) [93] выявил схожую линейную регрессию « $z-\alpha_{\text{above}}$ », но для нашей выборки не обнаружено статистически значимой корреляции этих величин (рис. 6). Учитывая, что выборка [93] — галактики, а наша выборка — смесь галактик и квазаров, подобный результат может объясняться влиянием объектов с разнообразной морфологией на относительно близких  $z$ . Это хорошо видно и на рис. 6а: с ростом  $z$  мы видим, в основном, мощные GPS. Разбиение нашей выборки на малые интервалы по  $dz = 0.2$  позволило обнаружить тенденцию укрупнения медианного спектрального индекса. Разнообразие свойств объектов на относительно малых  $z$  отображено в большом разбросе значений  $\alpha_{\text{med}}$ , тогда как, начиная с  $z > 2$ , мы наблюдаем четкий линейный тренд.

Оценки плотностей потоков «горячих» пятен на картах микроволнового фона миссии Planck позволили получить информацию о характере поведения спектров GPS в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне в дополнение к имеющимся данным из каталога Planck. Построение двухчастотных спектров источников в этом диапазоне показало, что часть GPS можно отнести к «промежуточным», синхротронным объектам, у которых наряду с синхротронным излучением есть подозрение на пылевую составляющую. Подъем спектров на высоких частотах может свидетельствовать как о наличии сигнала от холодной галактической пыли на картах Planck, так и о вкладе собственной внутренней пыли источников. Поскольку спектральные индексы получены на основе оценочных данных, мы не можем сделать более конкретные выводы.

Справедливо отмечено [96], что исследование GPS часто проводится на основе классических ярких выборок, в основе которых лежал отбор по спектральной форме без учета физических особенностей. Такой консервативный подход до сих пор

ведет к отсутствию согласованного набора критериев, таких, как компактная структура (менее кпк), степень поляризации и переменность, наличие релятивистских эффектов. Измерения этих величин доступны для ограниченного числа кандидатов, поэтому выборки изначально неоднородны.

Необходимо учитывать эффекты селекции, оказывающие влияние на результат: отсутствие систематических дециметровых измерений при первоначальном отборе GPS [15], отсутствие широкого подхода при построении выборки [15] (отбор производился на одной частоте — 5 ГГц), недостаток измерений неярких GPS. Очевидно, что при первоначальном отборе доля объектов была пропущена из-за недостатка измерений и невозможности их классифицировать как GPS. Не совсем ясно, сколько таких объектов может быть, так как все оценки популяции GPS делались на ярких выборках. А здесь речь идет о слабых объектах, для которых систематические измерения не проводились.

GPS-объекты представляют и практический интерес — как яркие компактные объекты со стационарным радиоизлучением — так называемые стандарты по потоку. Знание плотности потока радиоизлучения таких объектов с определенной точностью позволяет использовать их в прикладных задачах и вне области астрофизики, например космической геодезии. В радиоастрономии классические GPS («type 1») являются хорошими кандидатами в калибровочные по потоку объекты.

## 7. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате многолетнего мониторинга на PATAH-600 GPS-объектов и кандидатов в GPS в период 2006–2017 гг. получено:

1. Каталог квазисовременных измерений спектральных плотностей потоков GPS на частотах 1.1, 2.3, 4.8, 7.7/8.2, 11.2 и 21.7 ГГц. Построены континуальные радиоспектры GPS в диапазоне 0.072–857 ГГц, основу которых образуют измерения PATAH-600.
2. Отобрано 164 GPS и кандидатов, из них 17 обнаружено впервые. Средняя радиосветимость GPS по выборке —  $L_{5\text{GHz}} \sim 10^{43-44}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ . Подтверждается относительно малая доля GPS (1–2%) среди ярких АЯГ. Выборка содержит GPS двух основных типов в соотношении 60% к 40% (первый и второй типы). Статистическое отличие спектральных параметров GPS двух типов и их распределений обнаруживает неоднородность физических свойств формирования синхротронного излучения в компактных внегалактических объектах.

3. Подтвержден дефицит GPS с низкими значениями частоты максимума (менее 1 ГГц) на больших красных смещениях  $z > 2$ . Обнаружено статистическое укручение спектров GPS с ростом красного смещения в заданных космологических интервалах. На красных смещениях до  $z = 1.5$  отчетливо заметен вклад объектов разнообразной морфологии, на  $z > 2$  усиливается вклад GPS с более крутыми спектрами в оптически тонких областях излучения.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность научному и техническому коллективу САО РАН, обеспечивающему круглосуточное функционирование радиотелескопа РАТАН-600. В работе были широко использованы ресурсы CATS, NED IPAC и VizieR.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение N007-03-283). МГМ и ТВМ также благодарны финансированию за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- C. P. O'Dea, S. A. Baum, and C. Stanghellini, *Astrophys. J.* **380**, 66 (1991).
- R. Fanti, C. Fanti, R. T. Schilizzi, et al., *Astron. and Astrophys.* **231**, 333 (1990).
- C. Fanti, R. Fanti, D. Dallacasa, et al., *Astron. and Astrophys.* **302**, 317 (1995).
- J. A. Peacock and J. V. Wall, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **198**, 843 (1982).
- W. van Breugel, G. Miley, and T. Heckman, *Astron. J.* **89**, 5 (1984).
- C. Fanti, R. Fanti, P. Parma, et al., *Astron. and Astrophys.* **143**, 292 (1985).
- D. Dallacasa, C. Stanghellini, M. Centonza, and R. Fanti, *Astron. and Astrophys.* **363**, 887 (2000).
- L. Rudnick and T. W. Jones, *Astrophys. J.* **255**, 39 (1982).
- C. P. O'Dea, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **110**, 493 (1998).
- S. Tinti, D. Dallacasa, G. de Zotti, et al., *Astron. and Astrophys.* **432**, 31 (2005).
- N. N. Bursov, *Astronomy Reports* **41**, 35 (1997).
- M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, M. G. Larionov, and A. K. Erkenov, *Astronomy Reports* **55**, 187 (2011).
- M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, I. Torniaainen, et al., *Astron. and Astrophys.* **544**, A25 (2012).
- M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, I. Torniaainen, et al., *VizieR Online Data Catalog J/A+A/544/A25* (2012).
- M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, T. V. Mufakharov, et al., *Astrophysical Bulletin* **68**, 262 (2013).
- I. A. G. Snellen, R. T. Schilizzi, A. G. de Bruyn, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **131**, 435 (1998).
- R. B. Phillips and R. L. Mutel, *Astron. and Astrophys.* **106**, 21 (1982).
- J. C. Carvalho, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **215**, 463 (1985).
- P. N. Wilkinson, A. G. Polatidis, A. C. S. Readhead, et al., *Astrophys. J.* **432**, L87 (1994).
- C. P. O'Dea and S. A. Baum, *Astron. J.* **113**, 148 (1997).
- I. Owsianik and J. E. Conway, *Astron. and Astrophys.* **337**, 69 (1998).
- M. Murgia, *Publ. Astron. Soc. Australia* **20**, 19 (2003).
- S. A. Baum, C. P. O'Dea, D. W. Murphy, and A. G. de Bruyn, *Astron. and Astrophys.* **232**, 19 (1990).
- A. G. Polatidis and J. E. Conway, *Publ. Astron. Soc. Australia* **20**, 69 (2003).
- J. M. Bai and M. G. Lee, *Journal of Korean Astronomical Society* **38**, 33 (2005).
- I. Torniaainen, M. Tornikoski, H. Teräsraanta, et al., *Astron. and Astrophys.* **435**, 839 (2005).
- M. Tornikoski, I. Torniaainen, A. Lähteenmäki, et al., *Astronomische Nachrichten* **330**, 128 (2009).
- I. Torniaainen, M. Tornikoski, M. Turunen, et al., *Astron. and Astrophys.* **482**, 483 (2008).
- E. Massaro, P. Giommi, C. Leto, et al., *Astron. and Astrophys.* **495**, 691 (2009).
- Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim, et al., *Astron. and Astrophys.* **536**, A14 (2011).
- R. C. Bolton, C. J. Chandler, G. Cotter, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **367**, 323 (2006).
- B. Vollmer, T. P. Krichbaum, E. Angelakis, and Y. Y. Kovalev, *Astron. and Astrophys.* **489**, 49 (2008).
- H. Falcke, E. Körding, and N. M. Nagar, *New Astronomy Reviews* **48**, 1157 (2004).
- E. M. Sadler, *Astronomische Nachrichten* **337**, 105 (2016).
- R. Coppejans, S. Frey, D. Cseh, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **463**, 3260 (2016).
- R. Coppejans, D. Cseh, S. van Velzen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459**, 2455 (2016).
- R. Coppejans, D. Cseh, W. L. Williams, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **450**, 1477 (2015).



38. R. Coppejans, S. van Velzen, H. T. Intema, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **467**, 2039 (2017).
39. H. T. Intema, P. Jagannathan, K. P. Mooley, and D. A. Frail, *Astron. and Astrophys.* **598**, A78 (2017).
40. N. Hurley-Walker, J. R. Callingham, P. J. Hancock, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464**, 1146 (2017).
41. J. R. Callingham, R. D. Ekers, B. M. Gaensler, et al., *Astrophys. J.* **836**, 174 (2017).
42. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, and V. N. Chernenkov, *Baltic Astronomy* **6**, 275 (1997).
43. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory* **58**, 118 (2005).
44. K. I. Kellermann and I. I. K. Pauliny-Toth, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **19**, 373 (1981).
45. W. H. de Vries, P. D. Barthel, and C. P. O'Dea, *Astron. and Astrophys.* **321**, 105 (1997).
46. P. G. Edwards and S. J. Tingay, *Astron. and Astrophys.* **424**, 91 (2004).
47. P. G. Tsybulev, *Astrophysical Bulletin* **66**, 109 (2011).
48. R. Y. Udovitskiy, Y. V. Sotnikova, M. G. Mingaliev, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 496 (2016).
49. O. V. Verkhodanov, *ASP Conf. Series* **125**, 46 (1997).
50. M. G. Mingaliev, V. A. Stolyarov, R. D. Davies, et al., *Astron. and Astrophys.* **370**, 78 (2001).
51. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, N. N. Bursov, et al., *Astronomy Reports* **51**, 343 (2007).
52. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, N. S. Kardashev, and M. G. Larionov, *Astronomy Reports* **53**, 487 (2009).
53. R. A. Perley and B. J. Butler, *Astrophys. J. Suppl.* **204**, 19 (2013).
54. M. Ott, A. Witzel, A. Quirrenbach, et al., *Astron. and Astrophys.* **284**, 331 (1994).
55. J. W. M. Baars, R. Genzel, I. I. K. Pauliny-Toth, and A. Witzel, *Astron. and Astrophys.* **61**, 99 (1977).
56. H. Tabara and M. Inoue, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **39**, 379 (1980).
57. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astrophysical Bulletin* **70**, 156 (2015).
58. M. G. Mingaliev, Y. V. Sotnikova, R. Y. Udovitskiy, et al., *Astron. and Astrophys.* **572**, A59 (2014).
59. M. Orienti and D. Dallacasa, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **438**, 463 (2014).
60. C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **208**, 20 (2013).
61. Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim, et al., *Astron. and Astrophys.* **571**, A1 (2014).
62. Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim, et al., *Astron. and Astrophys.* **582**, A28 (2015).
63. O. V. Verkhodanov, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astronomy Reports* **60**, 630 (2016).
64. F. Bonnarel, P. Fernique, O. Bienaymé, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 33 (2000).
65. T. Boch and P. Fernique, *ASP Conf. Series* **485**, 277 (2014).
66. E. Bertin and S. Arnouts, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **117**, 393 (1996).
67. Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim, et al., *Astron. and Astrophys.* **571**, A28 (2014).
68. Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim, et al., *Astron. and Astrophys.* **594**, A26 (2016).
69. Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim, et al., *Astron. and Astrophys.* **550**, A133 (2013).
70. Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim, et al., *Astron. and Astrophys.* **596**, A106 (2016).
71. W. M. Lane, W. D. Cotton, J. F. Helmboldt, and N. E. Kassim, *Radio Science* **47**, RS0K04 (2012).
72. J. N. Douglas, F. N. Bash, F. A. Bozyan, et al., *Astron. J.* **111**, 1945 (1996).
73. H. Kuehr, A. Witzel, I. I. K. Pauliny-Toth, and U. Nauber, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **45**, 367 (1981).
74. A. Wright and R. Otrupceek, *PKS Catalog* (1990).
75. R. B. Rengelink, Y. Tang, A. G. de Bruyn, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **124**, 259 (1997).
76. X. Zhang, Y. Zheng, H. Chen, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **121**, 59 (1997).
77. C. De Breuck, Y. Tang, A. G. de Bruyn, et al., *Astron. and Astrophys.* **394**, 59 (2002).
78. M. I. Large, B. Y. Mills, A. G. Little, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **194**, 693 (1981).
79. J. M. Durdin, D. Pleticha, J. J. Condon, et al., *National Astronomy and Ionospheric Center Report* **45**, 1 (1975).
80. D. Dallacasa, C. Stanghellini, M. Centonza, and R. Fanti, *Astron. and Astrophys.* **363**, 887 (2000).
81. C. Stanghellini, C. P. O'Dea, D. Dallacasa, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **131**, 303 (1998).
82. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., *Astron. J.* **115**, 1693 (1998).
83. E. Flesch and M. J. Hardcastle, *Astron. and Astrophys.* **427**, 387 (2004).
84. R. S. Dixon, *Astrophys. J. Suppl.* **20**, 1 (1970).
85. R. A. Duncan, G. L. White, R. Wark, et al., *Proceedings of the Astronomical Society of Australia* **10**, 310 (1993).
86. L. Petrov, Y. Y. Kovalev, E. Fomalont, and D. Gordon, *Astron. J.* **129**, 1163 (2005).
87. L. Petrov, Y. Y. Kovalev, E. B. Fomalont, and D. Gordon, *Astron. J.* **131**, 1872 (2006).
88. Y. Y. Kovalev, L. Petrov, E. B. Fomalont, and D. Gordon, *Astron. J.* **133**, 1236 (2007).
89. Y. Y. Kovalev, N. A. Nizhelsky, Y. A. Kovalev, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **139**, 545 (1999).
90. S. O. Kiirov, M. G. Mingaliev, V. A. Stolyarov, and M. S. Stupalov, *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory* **54**, 5 (2002).
91. List of VLA Calibrators, <https://science.nrao.edu/facilities/vla/observing/callist>.
92. I. Tornainen, PhD thesis (2008), <http://lib.tkk.fi/Diss/2008/isbn9789512293551/>.
93. H. J. A. Roettgering, R. van Ojik, G. K. Miley, et al., *Astron. and Astrophys.* **326**, 505 (1997).
94. V. I. Sligh, *Nature* **199**, 682 (1963).

95. R. L. Mutel, M. W. Hodges, and R. B. Phillips, *Astrophys. J.* **290**, 86 (1985).
96. S. Tinti and G. de Zotti, *Astron. and Astrophys.* **445**, 889 (2006).
97. R. J. C. Vera, M. Tornikoski, and A. Lähteenmäki, in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series* (2017), vol. 49, pp. 139–139.
98. A. G. Pacholczyk, *Radio astrophysics. Nonthermal processes in galactic and extragalactic sources* (W. H. Freeman, San Francisco, 1970).
99. N. de Vries, I. A. G. Snellen, R. T. Schilizzi, et al., *Astron. and Astrophys.* **498**, 641 (2009).
100. T. An and W. A. Baan, *Astrophys. J.* **760**, 77 (2012).
101. J. D. Collier, S. J. Tingay, J. R. Callingham, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **477**, 578 (2018).
102. C. P. O’Dea, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **245**, 20P (1990).

### Multifrequency Study of GHz-peaked Spectrum Sources

**Yu. V. Sotnikova, T. V. Mufakharov, E. K. Majorova, M. G. Mingaliev, R. Yu. Udovitskii, N. N. Bursov, and T. A. Semenova**

Gigahertz-Peaked spectrum (GPS) sources are compact active galactic nuclei, presumably young precursors of bright radio sources. The study of GPS radio properties provides information about the features of synchrotron radiation in extragalactic sources. Also in applied research, GPS sources are useful as compact stationary radio sources in the sky for astrometric purposes. This paper presents the results of a multifrequency GPS study based on quasi-simultaneous measurements with the RATAN-600 radio telescope during the 2006–2017 period. A catalog of GPS spectral flux densities at six frequencies—1.1, 2.3, 4.8, 7.7/8.2, 11.2, and 21.7 GHz—is obtained. In addition, for the analysis of radio spectra, data from low-frequency surveys GLEAM (GaLactic and Extragalactic Allsky Murchison widefield array survey) and TGSS (Tata institute for fundamental research GMRT Sky Survey) and high-frequency measurements from Planck survey are used. A total number of 164 GPS and candidates have been identified (17 of them are new discoveries), which makes up a small fraction of GPS in the initial sample of bright AGNs—about 2%. The physical properties and formation conditions of synchrotron radiation is found to be quite different in GPS of different AGNs types. The deficit of distant GPS ( $z > 2$ ) with low maximum frequencies (less than 1 GHz) has been confirmed. The existing “size–peak frequency” anticorrelation is continuous. The continuum radio spectra are found to become statistically steeper with increasing redshift.

Keywords: *radio continuum: galaxies—galaxies: active, nuclei*