УДК 524.7-77

# ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОИСТОЧНИКОВ В ЦЕНТРАЛЬНОМ СЕЧЕНИИ КАТАЛОГА RZF. ПОИСК ОБЪЕКТОВ С УЛЬТРАКРУТЫМИ СПЕКТРАМИ

© 2019 г. Ю. Н. Парийский<sup>1\*</sup>, Т. А. Семенова<sup>2</sup>, А. В. Темирова<sup>1\*\*</sup>, Н. Н. Бурсов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Санкт-Петербургский филиал, Санкт-Петербург, Россия <sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия Поступила в редакцию 05.06.2018 г.; принята в печать 13.09.2018 г.

В работе представлены результаты обработки и селекции данных каталога RZF (Ratan Zenith Field). Использован глубокий обзор неба в области  $0^h \leq R.A. \leq 24^h$ ,  $40.5^\circ \leq DEC \leq 42.5^\circ$  на радиотелескопе РАТАН-600. В центральном сечении обзора в диапазоне  $\pm 2'$  обнаружено 448 объектов, из них 69 объектов с ультракрутыми спектрами. По цифровому оптическому обзору SDSS (DR12) с использованием радиокарт NVSS и каталогов FIRST проведено отождествление 208 радиоисточников из RZF-каталога, полученного в рамках программы "Генетический код Вселенной". Исследованы характеристики данных объектов, получено распределение SDSS-галактик на двухцветной диаграмме. Для 27 объектов со спектральными индексами  $\alpha < -1.1$ ,  $S \propto \nu^{\alpha}$ , для которых приведены звездные величины в разных фильтрах (в SDDS обзоре), определены фотометрические красные смещения и их радиосветимости на частотах 3940 и 1400 МГц. Показано, что в выборке объектов с USS (Ultra Steep Spectra) спектрами 12 галактик относятся к категории близких галактик (z < 0.5), обнаруженных в сантиметровом диапазоне длин волн ( $\lambda = 7.6$  см), с относительно высокими радиосветимостями (типа FR II или промежуточных типов FRI-FRII). И только одна радиогалактика оказалась редкой близкой галактикой с относительно низкой радиосветимостью  $L_{1400 \text{ MFu}} = 1.51 \times 10^{24} \text{ вт/Гц}$  типа FRI. Два объекта являются кандидатами в объекты с GPS (Gigahertz Peaked spectra) спектрами.

DOI: 10.1134/S0004629919030083

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Особый интерес в последние годы привлекает популяция радиогалактик класса FR II с ультракрутыми спектрами. Выяснено, что количество энергии, заключенное в компонентах этих крупных объектов в форме релятивистского газа и магнитного поля, намного превышает количество энергии в любом другом объекте Вселенной. В предельно глубоких обзорах в сантиметровом диапазоне на РАТАН-600 были найдены мощные радиогалактики, возникшие в первые 10% времени жизни Вселенной. Они исследованы с привлечением лучших зарубежных интерферометрических систем типа MERLIN, VLBI больших оптических и ИК телескопов. Принято считать, что эти объекты связаны со сверхмассивными черными дырами первого поколения. Оказалось неожиданным, что в ранней Вселенной были черные дыры с массой более  $10^9 M_{\odot}$ . Соотношение "спектральный индекскрасное смещение" является одним из ключевых при поиске и исследовании далеких радиогалактик. Одной из первых работ, где описывается связь спектрального индекса радиоисточника с расстоянием до него, была работа Витфилда, опубликованная в 1957 г. [1], а также работы [2, 3]. Позже подобные исследования были опубликованы Блюменталем, Майли и др. [4, 5]. Они стали важным селекционным фактором выделения далеких радиогалактик у ряда групп [6–20].

Однако связь между крутизной спектра и красным смещением еще до конца не исследована. Спектральные характеристики радиоисточников относятся к числу наиболее простых и легко определяемых.

После относительно короткой эпохи в радиоастрономии 1950-х годов, когда всем внегалактическим радиоисточникам по данным на метровых волнах приписывали некоторый средний спектральный индекс  $\alpha \sim -1$  ( $S \propto \nu^{\alpha}$ ), на более коротких волнах была выявлена популяция объектов с существенно более плоскими спектрами. В

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup>E-mail: unipar@rambler.ru

<sup>\*\*</sup>E-mail: adelina\_temirova@mail.ru

течение последующего десятилетия было принято деление внегалактических радиоисточников на две популяции:  $\alpha \sim -1$  и  $\alpha \sim 0$ . К первой относили радиогалактики с протяженными компонентами, а ко второй — ядерное излучение галактик и квазаров [21]. Это деление уже выявлялось среди достаточно близких объектов, и появились попытки учесть эволюцию этих популяций в течение всей жизни Вселенной [22]. Эффекты эволюции должны проявиться, прежде всего, на объектах высокой светимости, наблюдаемых на больших расстояниях. Так, радиогалактики типа FR II доступны наблюдениям на РАТАН-600 на любых красных смещениях, формально — вплоть до эпохи рекомбинации излучения радиогалактик. В первых классических работах по формированию сверхмассивных черных дыр, ответственных за радиоизлучение радиогалактик, предполагалось, что темпы их формирования сравнимы с возрастом Вселенной и на красных смещениях z > 2 мощных радиогалактик еще не должно быть. Однако наблюдения показали, что это не так, и есть популяция очень далеких и мощных радиогалактик с красными смещениями около  $z \sim 5$ .

Обработка предельно глубоких обзоров на РАТАН-600 позволила существенно уточнить природу предельно далеких объектов во Вселенной типа радиогалактик FR II [23] на  $z \gg 1$ . Чувствительность РАТАН-600 достаточна для обнаружения этой популяции на любых расстояниях, а высокая оптическая светимость этих объектов допускает измерение красных смещений с помощью 6-метрового телескопа САО РАН. Совместные радио и оптические исследования (проект "Большое Трио" с использованием 3 больших телескопов — РАТАН-600, VLA и 6-метрового телескопа CAO) — уже выявили три источника с  $z_{sp} > 3$ с крутыми спектрами [24]. Была обнаружена радиогалактика с предельно высокой радиосветимостью на z = 4.514 (RCJ0311+0507), возникшая в первый миллиард лет жизни Вселенной [25-30]. Опыт показал, что особенно интересны объекты с ультракрутыми ( $\alpha \leq -1.3$ ) и крутыми спектрами  $(-1.3 < \alpha \leq -1.1)$ . Глубокий околозенитный обзор на РАТАН-600, названный RZF (RATAN Zenith Field), в сантиметровом диапазоне ( $\lambda = 7.6$  см)[31, 32] выявил радиогалактики с ультракрутыми и крутыми спектрами, которые могут быть возможными кандидатами в предельно далекие объекты. Тем не менее USS (Ultra Steep Spectra) спектры не могут быть гарантом обнаружения далеких галактик (High Z Radio Galaxies, HZRG) и наоборот [33, 34].

В работах [35–37] предложен новый метод поиска далеких галактик с активными ядрами (Active Galactic Nuclei, AGN), спектры которых имеют максимумы в мегагерцовом диапазоне (Megahertz-Peaked Spectra, MGP). В последнее время в мировой практике при поиске далеких галактик используются низкочастотные наблюдения с высоким разрешением, например, с помощью LOFAR (Low Frequence Array) [38, 39]. Низкочастотные наблюдения имеют преимущества в поисках USS спектров, т.к. плотность потока выше на низких частотах из-за крутизны спектра. В настоящей работе анализируются радиоисточники в центральной полосе RZF обзора ( $\pm 2'$ ). Особое внимание уделено объектам с крутыми и ультракрутыми спектрами.

## 2. ВЫБОРКА ДАННЫХ ИЗ КАТАЛОГА RZF

Наблюдения проводились в рамках программы "Генетический код Вселенной" на радиотелескопе РАТАН-600 в северном секторе с 1998 по 2009 г. на частотах от 0.55 до 30 ГГц. В результате обработки данных был получен каталог RZF источников. При отождествлении RZF объектов с другими каталогами использовались координаты высокоточных дециметровых каталогов NVSS или FIRST. На основании околозенитного RZF каталога проведена селекция данных по спектральным характеристикам источников. Спектры источников были построены по опубликованным данным, взятым из базы данных CATS, с использованием программного пакета spg [40, 41]. В полосу обзора попали данные более 100 каталогов. Количество радиоисточников каталога NVSS, попадающих в область околозенитного обзора RZF, составляет 31 940 объектов в области  $0^h \leq R.A. \leq 24^h$ , 40°30'42" < DEC < 42°30'42". Для 10 299 источников построены спектры и определены спектральные индексы на длине волны 7.6 см. Классификация по спектральным индексам для NVSS объектов приведена на рис. 1, где показано, что доля источников с крутыми и ультракрутыми спектрами составляет 1483 объекта, с нормальными спектрами — 8318 объектов и с инвертированными спектрами — 498 объектов.

Для наглядности под заголовком "Normal" мы привели объекты с крутыми, нормальными и плоскими спектрами ( $\alpha \leq -1.0$ ), а под заголовком "Inverted" — с плоскими и инвертированными спектрами ( $\alpha > 0$ ). Подтверждается вывод о малом числе объектов с инвертированными спектрами. Доля объектов с крутыми и ультракрутыми спектрами ( $\alpha < -1.1$ ) составляет примерно 15%.

В область обзора RZF попадает около 15 000 объектов более глубокого обзора VLA каталога FIRST [42] с минимальной плотностью потоков источников около 1 мЯн ( $\nu = 1400$  МГц). В двухградусную область обзора ( $7^h \leq \text{R.A.} \leq 17^h$ )



Рис. 1. Данные о 10 299 спектральных индексах NVSS объектов, видимых в околозенитном обзоре RZF.

для слабых объектов каталога FIRST попадает 12863 источника. В рассматриваемом сантиметровом диапазоне ( $\lambda = 7.6$  см) доминируют источники с нормальными спектрами, с небольшой дисперсией спектрального индекса относительно среднего значения ( $\alpha = -0.76 \pm 0.06$ ). По объектам каталога RZF построены спектры почти всех источников. попадающих в центральную полосу обзора, и определены их спектральные индексы. В этой полосе наблюдений ( $41^{\circ}30'42'' \pm 2'$ ) обнаружено 448 объектов (см. рис. 2), из них 69 объектов с USS спектрами ( $\alpha < -1.1, S \propto \nu^{\alpha}$ ), т.е. 15%, 80 объектов с крутыми спектрами ( $-1.1 \le \alpha \le -0.9$ ) (18%), 163 объекта с нормальными спектрами (36.5%), 120 объектов с плоскими спектрами ( $-0.5 < \alpha <$ < 0.5) (27%) и 11 объектов с инвертированными спектрами ( $\alpha \ge 0.5$ ), всего 2.5%. Для 5 объектов (1%) тип не определен из-за недостатка данных.

## 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫБОРКИ ОБЪЕКТОВ С УЛЬТРАКРУТЫМИ СПЕКТРАМИ

Из представленной выборки в 448 источников в центральной полосе каталога RZF рассмотрим 69 объектов с крутыми и ультракрутыми спектрами  $\alpha < -1.1$ . Разные авторы определяли значения спектральных индексов для ультракрутых спектров от  $\alpha < -0.981$  до  $\alpha < -1.3$  [43-48]. В качестве низкочастотных каталогов при построении спектров USS источников чаще других использовались VLSSr 74 (МГц) (Very Large Array (VLA) Low-frequency Sky Survey redux), учитывающий атмосферные искажения в полученных ранее данных с угловым разрешением 75" [49], а также каталоги WENSS (325 МГц), ТХЅ (365МГц) и опубликованный в 2017 г. первый альтернативный релиз данных TGSS ADR1 (Tata institute for fundamental research GMRT Sky Survey Alternative Release), полученный в результате обзора неба



**Рис. 2.** Распределение спектральных индексов по данным каталога RZF в центральной полосе обзора (*N* = 448 объектов).

на GMRT (Giant Metrewave Radio Telescope) на частоте 150 МГц с угловым разрешением  $25'' \times 25''$ , что почти в 2 раза лучше, чем у обзора NVSS. Порог обнаружения составляет  $7\sigma$  [50].

В выборке из 69 источников 16 спектров имеют степенной характер, из них только 5 спектров построены по двум точкам — 1400 МГц и 3940 МГц. HZRG как правило, имеют степенные спектры, которые не "укручаются" на высоких частотах [17, 51, 52], но на низких частотах эти спектры могут поворачиваться [53, 54] из-за синхротронного самопоглощения и тормозного поглощения. Девять источников рассматриваемой выборки имеют спектры с максимумами в мегагерцовом диапазоне (Megahertz-Peaked Spectra, MGP), что указывает на возможность их принадлежности к HZRG радиогалактикам [37]. 2 источника — RZF J070010+412930 и J224408+412926 кандидаты в объекты с GPS (Gigahertz- Peaked Spectra) спектрами.

На рис. З представлено распределение плотностей потоков для 69 объектов с USS спектрами на частотах 3940 и 1400 МГц. Большинство объектов на длине волны 7.6 см имеют плотности потоков меньше 10 мЯн (N = 55, 80%), 8 источников (11%) с плотностью потока 10  $< S_{3940} < 20$  мЯн и только 6 объектов (9%) с плотностью потока больше 20 мЯн. Таким образом, получена выборка слабых по плотности потоков источников с ультракрутыми спектрами с медианной плотностью потока  $S_{3940, median} \sim 5.8$  мЯн в сантиметровом диапазоне длин волн.

Большинство объектов на длине волны 21 см имеют плотности потоков от 6 до 20 мЯн (N =

= 35, 51%), для 24 источников (35%) плотности потоков располагаются в интервале  $20 \le S_{1400 \text{ МГц}} \le \le 40 \text{ мЯн}$ , для 5 объектов (7%) в интервале  $40 \le \le S_{1400 \text{ Мгц}} \le 100 \text{ мЯн}$ , а также 5 источников (7%) с плотностью потоков  $S_{1400 \text{ МГц}} > 100 \text{ мЯн}$ . Для 27 объектов с USS спектрами удалось провести оптическое отождествление с помощью обзора SDSS (DR7, DR12) [55], причем 19 объектов оказались галактиками, 8 — звездообразными объектами. На рис. 4 показаны зависимости спектральных индексов от плотностей потоков на частотах 1400 и 3940 МГц.

Степенные спектры имеют 6 источников, 5 галактик и 1 звездообразный объект. Отношение плотностей потоков  $S_{1400 \text{ MFu}}/S_{390 \text{ MFu}}$  составляет от ~2 до 10.5. Для 27 объектов, для которых определены цветовые характеристики из обзора SDSS, были оценены фотометрические красные смещения  $z_{\rm ph}$ , используя модель PEGAS [56, 57] для распределения энергии в спектре SED (Spectral Energy Distribution). На рис. 5 представлена гистограмма распределения по  $z_{\rm ph}$  27 объектов с USS спектрами, из них 19 источников относятся к галактикам (заштрихованная часть), остальные 8 объектов к звездообразным объектам.

Как видно из рис. 5, 12 галактик имеют фотометрическое красное смещение в диапазоне  $0.08 \le z_{\rm ph} < 0.5$  и относятся к близким галактикам ( $z_{\rm mean} = 0.27$ ), 7 галактик находятся в диапазоне красных смещений  $0.5 \le z_{\rm ph} < 1.0$ . В работе [58] отмечено, что сравнение спектроскопических и фотометрических красных смещений показывает, что на малых *z* они практически совпадают вплоть до



Рис. 3. Распределение плотностей потоков выборки из 69 источников с USS спектрами на частотах 1400 МГц (а) ( $S_{1400 \text{ MF} \mu, \text{median}} = 20.8 \text{ мЯ}$ н) и 3940 МГц (б) ( $S_{3940 \text{ MF} \mu, \text{median}} = 5.8 \text{ мЯ}$ н).



Рис. 4. Зависимости спектральных индексов от плотностей потоков выборки источников с ультракрутыми спектрами (N = 27) на частотах 1400 МГц (а) и 3940 МГц (б). Галактики обозначены квадратиками, звездообразные объекты — кружками.

 $z \leq 1.5$ . В рассматриваемой выборке все галактики имеют  $z_{\rm ph} < 1.5$ .

Были рассчитаны также радиосветимости этих объектов на частотах 1400, 3940 МГц по формуле, приведенной в работе Miley and De Breuck [16]:

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

где  $D_L$  — фотометрическое расстояние,  $S_{\nu}$  — плотность потока на частоте  $\nu^1$ . На рис. 6 для 19 USS радиогалактик обзора RZF показано распределение логарифма радиосветимости  $\log L_{1400 \text{ МГц}}$  (L—в единицах Вт/Гц) на частоте 1400 МГц. Радиосветимость на частоте 1400 МГц изменяется в диапазоне  $1.51 \times 10^{24} \leq L_{1400 \text{ МГц}} \leq 17 \times 10^{27} \text{ Вт/Гц}, L_{1400 \text{ МГц}} \geq 26.0 [\text{Вт/Гц}]$ галактики относятся к FR II типу, при промежуточных светимостях встречаются как FR I, так и FR II типы, а также смешанные FR I и FR II типы. 7 галактик оказались промежуточной светимости, из них 5 объектов относятся к близким галактикам. 11 галактик оказались типа FR II, из них 6 галактик относятся к близким. Одна галактика оказалась типа FR I (J0722+4129), со светимостью  $L_{1400 \text{ МГц}} = 1.51 \times 10^{24} \text{ Вт/Гц} с$ 

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Приняты следующие величины космологических параметров:  $H_0 = 71$  км с<sup>-1</sup> Мпк<sup>-1</sup>,  $\Omega_m = 0.266$ ,  $\Omega_{\Lambda} = 0.734$ .



Рис. 5. Распределение *z*<sub>ph</sub> для 27 объектов с ультракрутыми спектрами. Заштрихованная часть гистограммы относится к галактикам (*N* = 19), *z*<sub>ph</sub>, *g*<sub>al</sub>, median = 0.53.



Рис. 6. Гистограмма распределения логарифма радиосветимости 27 объектов с USS спектрами на частоте 1400 МГц, log L<sub>1400 МГц</sub>, median = 27.06 Вт/Гц.

 $z_{\rm ph} = 0.08$ , которые очень редки [17]. В этой работе приведено одно из возможных объяснений объяснений этого феномена. Так, в 1970-е годы [59] было показано, что близкие галактики с крутыми спектрами находятся исключительно

в богатых радиоисточниками скоплениях. Было известно, что такие скопления демонстрируют более крутые спектральные индексы, чем сами радиоисточники, находящиеся ближе всего к центру скопления [60]. Это было интерпретировано как проявление давления межгалактического газа скопления, ограничивающего адиабатические потери протяженных компонентов радиогалактик [59, 61]. Протяженные компоненты будут расширяться адиабатически, пока не будет достигнуто равновесие между давлением внутри протяженного компонента и давлением окружающего газа. Из этого следует, что в центральных областях богатых скоплений галактик и в других подобных средах, где окружающая барионная плотность и температура достаточно велики, адиабатическое расширение протяженных компонентов радиоисточников ограничивается внешним давлением окружающего газа. При достижении равенства внутреннего и внешнего давления адиабатические потери протяженных компонентов сводятся к нулю, и на первое место выходят синхротронные потери, вследствие которых спектральный индекс радиоизлучения увеличивается.

Следует отметить, что радиоисточники, обнаруженные во время глубоких обзоров избранных площадок неба на РАТАН-600, исследовались частично на VLA и 6-м телескопе САО РАН. Так, в работе [24] приведены результаты исследований RC (RATAN Cold) объектов, обнаруженных во время глубокого обзора "Холод" на РАТАН-600 с крутыми и ультракрутыми спектрами по программе "Большое Трио". Семь радиогалактик оказались близкими галактиками с морфологией типа FR II, и только одна радиогалактика оказалась компактным объектом — CSS (Compact Steep Spectrum) с LAS = 0.4'' (Large Angular Size) со степенным спектром  $\alpha_{3940 \text{ MFu}} = -0.96$ . Для уточненных RCR (RATAN Cold Revised) объектов [62] для прямых восхождений  $07^h \le R.A. \le 17^h 30^m$  было проведено отождествление с помощью цифровых оптических обзоров, и определены свойства родительских галактик источников каталога RCR [63].

Ha рис. 7 представлено распределение  $\log L_{1400 \text{ MFu}}$  [Вт/Гц] в зависимости от фотометрического красного смещения z<sub>ph</sub> для 19 галактик. Доля источников типа FR II составляет 58% от общего числа рассматриваемых галактик. Большинство радиоисточников нашей выборки остаются неразрешенными в NVSS (разрешение  $\sim 45''$ ) и FIRST (разрешение 5.4'') изображениях, поэтому требуются наблюдения с более высокой разрешающей способностью для определения морфологии, физических размеров, яркостной температуры радиоизлучающих областей, для исследования природы AGN. В нашей USS выборке 4 источника с  $L_{1.4 \ \Gamma \Gamma \mu} > 10^{26} \ \mathrm{Bt}/\Gamma \mu$  при  $z_{\mathrm{ph, gal}} > 0.5$ можно рассматривать как возможных кандидатов в радиогромкие активные ядра галактик (AGNs)[64, 65]. В выборке 69 источников с USS спектрами обнаружены 2 GPS (Gigahertz Peaked Spectrum)



**Рис. 7.** Распределение  $\log L_{1400 \text{ МГц}}$  (*L* — в единицах Вт/Гц) при росте красного смещения  $z_{\text{ph}}$ .

объекта. Такие радиоисточники с самопоглощением на низких частотах интересны тем, что представляют собой начало эволюционного пути галактик в крупномасштабные радиоисточники [66, 67].

На рис. 8 слева представлена гистограмма распределения звездной величины  $m_r$ , справа — связь между звездной величиной  $m_r$  и радиосветимостью log  $L_{1400 \text{ MFu}}$  [Bt/Гц] для 19 галактик из обзора RZF.

Как видно из рис. 8а, практически все источники доступны наблюдениям на 6-м телескопе САО РАН. Галактики с  $L_{1400 \text{ MFu}} \ge 10^{26} \text{ Bt}/\text{Fu}$  (типа FR II) имеют звездную величину в фильтре r в диапазоне  $18 \le m_r \le 23$ .

На рис. 9 представлено изменение логарифма радиосветимости на частотах 1400 и 3940 МГц с изменением плотностей потоков  $t_{\rm NVSS}$  и  $t_{\rm RZF}$  в звездных величинах в фотометрической системе AB<sup>2</sup>. С уменьшением плотностей потоков источников радиосветимости галактик снижаются.

Для радиоисточников из нашей выборки был вычислен индекс активности в радиодиапазоне по формуле, приведенной в работе [68]<sup>3</sup>. Объекты с  $R_r > 1$  относят к активным в радиодиапазоне, для которых основной вклад в интегральное радиоизлучение дает активное ядро. В нашей выборке оказался только один источник с  $R_r < 1$ , который

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Перевод плотности потока в звездную величину в фотометрической системе AB производился по формуле:  $t_{\rm NVSS} = -2.5 \log(S_{\rm NVSS}/3631~{\rm Jm})$ , где  $S_{\rm NVSS}$  — плотность потока источника в обзоре NVSS.

 $<sup>{}^{3}</sup>R_{r} = 0.4(m_{r} - t_{\rm NVSS})$ , где  $m_{r}$  — звездная величина в обзоре SDSS в фильтре r,  $t_{\rm NVSS}$  — плотность потока источника в обзоре NVSS, выраженная в звездных величинах в фотометрической системе AB.



**Рис. 8.** Гистограмма распределения звездной величины  $m_r$  19 галактик обзора RZF  $m_{r,median} = 21.51$  (а) и связь между звездной величиной  $m_r$  и log  $L_{1400 \text{ MFi}}$  (L — в единицах Bt/Гц)(б).



Рис. 9. Изменение светимости  $\log L (L$  в единицах Вт/Гц) 19 галактик с USS спектрами при изменении плотностей потока в звездных величинах в системе AB  $t_{\text{NVSS}}$  (1400 МГц) (а) и  $t_{\text{RZF}}$  (3940 Мгц) (б).

можно рассматривать как радиоспокойный объект либо со спокойным AGN, либо как звездоформирующий источник (см. рис. 10). Нам детально удалось исследовать только 27 объектов с ультракрутыми спектрами  $\alpha \leq -1.1$  в сантиметровом диапазоне длин волн. Для 42 источников с USS спектрами необходимы дополнительные исследования.

## 4. ОПТИЧЕСКИЕ И РАДИО ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ RZF ОБЪЕКТОВ

В данной работе впервые более подробно проведено отождествление объектов каталога RZF (N = 448). Все объекты, полученные на центральном сечении обзора, отождествлены с радиоисточниками каталогов NVSS и FIRST. Ранее нами было проведено отождествление источников с помощью обзора SDSS (DR7) [69], но с появлением более полных версий обзора SDSS (DR12) [55] получена наиболее точная информация. Полоса каталога RZF пересекается с обзором SDSS (DR12) в интервале прямых восхождений  $7^h \leq R.A_{.2000} \leq$  $\leq 17^h 30^m$ , также есть частичные пересечения и в других областях по прямому восхождению. По результатам сопоставлений обзоров RZF и SDSS из 448 RZF объектов были отождествлены 208 объектов. В это число входят и 5 объектов, для которых не определены спектральные характеристики, но 3 из них отождествлены в обзоре SDSS<sup>4</sup>.

Результаты полученных спектральных и оптических характеристик представлены в табл. 1. В столбце 1 указан спектральный тип объекта: USS ( $\alpha \leq -1.1$ ) — источники с ультракрутыми спектрами, SS ( $1.1 < \alpha \leq -0.9$ ) — источники с крутыми спектрами, NS ( $-0.9 < \alpha \leq -0.5$ ) — источники с нормальными спектрами, FS ( $-0.5 < \alpha \leq 0.5$ ) — источники с плоскими спектрами, IS ( $\alpha > 0.5$ ) — источники с инвертированными спектрами. В столбце 2 (Sp I) приведен средний спектральный индекс рассматриваемого типа объектов, в столбце 3 (N) — количество рассматриваемых

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Из 5 объектов с неопределенными типами спектров 3 источника отождествлены — 2 галактики и 1 звезда.



**Рис. 10.** Связь индекса активности в радиодиапазоне  $R_r$  и радиосветимости  $\log L$  на частоте 1400 МГц (L — в единицах Вт/Гц) для 19 галактик.



Рис. 11. Распределение SDSS галактик на ранние и поздние типы.

объектов, в столбце 4 N(+) — количество отождествленных объектов в обзоре SDSS. В столбце 5 указано EF (empty field), в столбцах 6, 7, 8 соответственно указаны: Galaxies — галактики, QSO квазары, star — неопределенный тип объекта.

Для 56 объектов в обзоре SDSS также определяется выбранное поле, но не выделяются сами объекты, которые мы обозначили как "EF" пустое поле. Полученные спектральные значения объектов дополнены данными о морфологии радиоисточников по каталогу FIRST. Получено, что 136 объектов имеют точечную структуру, для 17 объектов разобрать тип источника невозможно, так как получается практически пустое поле, возможно объект слабый и не разрешается. К двойным объектам можно отнести 43 источника, из которых 6 имеют признаки FR II. Структуру тройного объекта имеют 8 объектов, из них

Туре	Sp I	N	N(+)	EF	Galaxies	QSO	Star
USS	-1.39	69(15.6%)	27	7	19	_	8
SS	-0.99	80(18.1%)	43	13	28	1	14
NS	-0.7	163 (36.9%)	76	22	44	3	29
FS	-0.18	120 (27.1%)	52	13	31	5	16
IS	0.67	10 (2.3%)	7	1	1	_	6
Всего		442	205	56	123	9	73

Таблица 1. Результаты оптического отождествления центральной полосы обзора RZF

три слабо разрешаются и один объект относится к источникам с многокомпонентной структурой. В большинстве случаев угловое разрешение обзора FIRST позволяет классифицировать исследуемые объекты по морфологическому типу. Для остальных объектов каталога RZF, не пересекающихся по прямому восхождению с обзором FIRST, получены NVSS-изображения.

Распределение SDSS галактик на двухцветной диаграмме (g - r) - (u - g) имеет два максимума — галактики ранних и поздних типов с оптимальным цветовым разделителем (u - r) = 2.22 вплоть до z = 0.4 [70]. В этой же работе указано, что данное утверждение применимо к выборкам с любыми красными смещениями. К ранним типам относятся объекты (галактики E, SO и Sa) с показателем цвета  $(u - r) \ge 2.22$ , к поздним (галактики Sb, Sc и Irr) — с показателем цвета (u - r) < 2.22. Ранний тип галактик — это близкие галактики. В результате обработки 125 SDSS галактик, пересекающихся с RZF объектами, получено, что к ранним типам относятся 62 объекта, а к поздним — 63 объекта (см. рис. 11).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В центральной полосе наблюдений зенитного обзора  $DEC = 41^{\circ}30'42'' \pm 2'$  на частоте 3940 МГц обнаружено 448 объектов, причем 69 объектов с USS спектрами. Рассчитаны потоки и спектральные индексы источников для всего используемого массива данных. По результатам оптических отождествлений RZF и SDSS обзоров получено, что из 448 RZF объектов 208 источников отождествлены. Из 208 объектов 125 источников интерпретируются как "Galaxy" (галактики), 73 как "Star" (возможно, звезды, структура этих объектов не определены), 9 как "QSO" (квазары). Распределение SDSS галактик (N = 125) на двухцветной диаграмме (g - r) - (u - g) показало, что к ранним типам галактик относятся 62 объекта, а к поздним — 63 объекта.

Рассматриваемая выборка источников USS включает относительно слабые по плотности потоков радиоисточники —  $S_{3940 \text{ MFu.median}} = 5.8 \text{ мЯн}$ и  $S_{1400 \text{ MFu,median}} = 20.8 \text{ мЯн.}$  Для 27 радиоисточников (39%) из выборки 69 USS объектов со спектральными индексами  $\alpha \leq -1.1$  определены фотометрические красные смещения, которые показали. что наша выборка USS объектов. из которых 19 галактик и 8 звездообразных объектов, в основном, относится к категории близких галактик (N=12) с  $z_{\rm ph, \, gal, \, mean}=0.27\pm$  $\pm 0.01$ , обнаруженных в сантиметровом диапазоне длин волн ( $\lambda = 7.6$  см). Такие радиоисточники расположены в плотной межгалактической среде богатых скоплений галактик, или заключены внутри родительской галактики [17, 52].

Радиосветимости рассматриваемых источников на частоте 1400 МГц изменяются в диапазоне  $1.51 \times 10^{24} \le L_{1400} \le 5.17 \times 10^{27}$  Вт/Гц,  $L_{1400 \text{ median}} \sim 4.25 \times 10^{26}$  Вт/Гц. 10 галактик по значению радиосветимостей  $L_{1400 \text{ мГц}} \ge 10^{26}$  Вт/Гц можно отнести к FR II типу, одна галактика с  $L_{1400 \text{ мГц}} = 1.51 \times 10^{24}$  Вт/Гц к FR I типу, остальные 8 объектов промежуточной светимости являются объектами смешанного типа FR I–FR II.

Среди рассматриваемых объектов с неразрешенными радиоморфологиями могут оказаться компактные источники, т.е. CSS (Compact Steep Spectra) и GPS объекты, которые могут представлять собой галактики, находящиеся в начале эволюционного пути в крупномасштабные радиоисточники. Таких источников — кандидатов в GPS — оказалось два. Практически все объекты. кроме одного, по значению индекса активности  $R_r > 1$  относятся к активным в радиодиапазоне, у которых основной вклад в интегральное радиоизлучение дает активное ядро. Для получения более полного материала по исследуемым источникам требуются радионаблюдения с высокими разрешениями, чтобы определить морфологию, физические размеры и яркостную температуру радиоизлучающих областей для определения их ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОИСТОЧНИКОВ

природы, а также более глубокие оптические наблюдения.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность О.В. Верходанову и О.П. Желенковой, Т. Муфахарову за помощь в работе, а также глубокую благодарность рецензенту, замечания которого значительно улучшили статью. Работа выполнена при частичной поддержке гранта ОФН-17. Наблюдения на РАТАН-600 проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт 14.518.11.7054).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- G. R. Whitfield, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 117, 680 (1957).
- 2. Р. Д. Дагкесаманский, Астрофизика 5, 297 (1969).
- 3. R. D. Dagkesamanskii, Nature 226, 432 (1970).
- 4. G. Blumenthal and G. Miley, Astron. and Astrophys. **80**, 13 (1979).
- 5. A. G. G. M. Tielens, G. K. Miley, and A. G. Willis, Astrophys. J. Suppl. **35**, 153 (1979).
- K. C. Chambers and G. K. Miley, in *The Evolution of the Universe of Galaxies*, Proc. of the Edwin Hubble Centennial Symposium, Berkeley, CA, June 21–23, 1989, edited by R. G. Gron, Astron. Soc. Pacific, p. 373 (1990).
- 7. S. Rawlings, S. Eales, and S. Warren, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **243**, 14 (1990).
- 8. P. McCarthy, V. K. Kapahi, W. van Breugel, and C. Subrahmanya, Astron. J. **100**, 1014 (1990).
- 9. V. K. Kapahi and V. K. Kulkarni, Astron. and Astrophys. **165**, 39 (1986).
- Yu. N. Parijskij, A. I. Kopylov, O. P. Zhelenkova, M. N. Naugolnaja, N. S. Soboleva, A. V. Temirova, V. V. Vitkovskii, Turkish Journal of Physics 18, 894 (1994).
- Yu. N. Panjskij, W. M. Goss, A. I. Kopylov, N. S. Soboleva, A. V. Temirova, O. V. Veriiodanov, O. P. Zhelenkova, and M. N. Naugolnaya, Bull. SAO 40, 5 (1996).
- H. J. A. Roettgering, M. Lacy, G. K. Miley, K. C. Chambers and R. Saunders, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 108, 79 (1994).
- А. И. Копылов, В. М. Госс, Ю. Н. Парийский, Н. С. Соболева, и др., Астрон. журн. 72(5), 613 (1995).
- 14. О. В. Верходанов, Ю. Н. Парийский, *Радиогалактики и космология* (М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009).
- W. van Breugel, C. de Breuck, S. A. Stanford, D. Stern, H. Röttgering, and G. Milley, Astrophys. J. 518, 61 (1999).
- 16. G. Miley and C. De Breuck, Astron. and Astrophys. Rev. 15, 67 (2008).
- I. J. Klamer, R. De Ekers, J. J. Bryant, R. W. Hunstead, E. M. Sadler, and C. De Breuck, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 371, 852 (2006).

- I. J. Klamer, R. De Ekers, E. M. Sadler, A. Weiss, R. Hunstead, and C. De Breuck, Astrophys. J. 621, L1 (2005).
- J. J. Bryant, H. M. Johnston, J. W. Broderick, R. W. Hunstead, C. De Breuck, and B. M. Gaensler, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 395, 1099 (2009).
- C. G. Bornancini, A. L. O'Mill, S. Gurovitch, and D. G. Lambas, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 406, 197 (2010).
- 21. В. Н. Курильчик, Т. Г. Ситник, Астрон. циркуляр No. 636, 1 (1971).
- 22. Ю. Н. Парийский, Д. В. Корольков, в сб.: Итоги науки и техники (М.: ВИНИТИ, 1986), с. 73.
- 23. B. L. Fanaroff and J. M. Riley, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **167**, 31P (1974).
- Ю. Н. Парийский, А. И. Копылов. А. В. Темирова, Н. С. Соболева, О. П. Желенкова, О. В. Верходанов, В. М. Госс, Т. А. Фатхуллин, Астрон. журн. 87(8), 739 (2010).
- А. И. Копылов, В. М. Госс, Ю. Н. Парийский, Н. С. Соболева, О. В. Верходанов, А. В. Темирова, О. П. Желенкова, Письма в Астрон. журн. 32(7), 483 (2006).
- Yu. Parijskij, P. Thomasson, O. P. Zhelenkova, A. Kopylov, *et al.*, Proc. of 11th Asian-Pacific Regional IAU Meeting, 2012, NARIT Conf. Ser. (NCS), 1, 10 (2012).
- 27. Yu. Parijskij, O. P. Zhelenkova, P. Thomasson, T. W. B. Muxlow, *et al.*, Proc. of Science, 10th European VLBI Network Symposium and EVN Users Meeting "VLBI and the new generation of radio arrays", September 20–24, 2010, Manchester UK, p. 1 (2010).
- Yu. Parijskij, O. P. Zhelenkova, P. Thomasson, A. I. Kopylov, A. V. Temirova, I. V Sokolov, V. N. Komarova, O. J. A. Bravo Calle, in *Gamma-ray Bursts: 15 Years of GRB Afterglows, Progenitors, Environments and Host Galaxies from the Nearby to the Early Universe*, edited by A. J. Castro-Tirado, J. Gorosabel and I. H. Park, EAS Publ. Ser. **61**, 439 (2013).
- Yu. N. Parijskij, P. Thomasson, A. I. Kopylov, O. P. Zhelenkova, *et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 439(3), 2314 (2014).
- Ю. Н. Парийский, О. П. Желенкова, А. И. Копылов, А. В. Темирова, О. В. Верходанов, В. Н. Комарова, Астрофиз. бюлл. 72(2), 103 (2017).
- Н. Н. Бурсов, Ю. Н. Парийский, Е. К. Майорова, М. Г. Мингалиев, А. Б. Берлин, Н. А. Нижельский, И. А. Глушкова, Т. А. Семенова, Астрон. журн. 84(3), 227 (2007).
- 32. Т. А. Семенова, Н. Н. Бурсов, Ю. Н. Парийский, Астрон.журн. **84**(4), 291 (2007).
- I. Waddington, R. A. Windhorst, S. H. Cohen, R. B. Partridge, H. Spinrad and D. Stern, Astrophys. J. 526, L77 (1999).
- M. J. Jarvis, H. Teimourian, C. Simpson, D. I. B. Rawlings, and S. B. Bonfield, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 398, L83 (2009).
- 35. H. Falcke, E. Körding, and N. M. Nagar, New Astron. Rev. 48, 1157 (2004).

- R. Coppejans, D. Cseh, W. L. Williams, S. van Velsen, and H. Falcke, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 450, 1477 (2015).
- R. Coppejans, S. van Velzen, H. T. Intema, C. Muller, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 467, 2039 (2017).
- L. Morabito, A. Deller, J. Moldón, R. Oonk, G. G. K. Milley, and H. J. A. Röttgering, Leiden Observatory, LOFAR Community Science Workshop, 3 June (2015).
- L. Morabito, thesis of Leiden University, 13 September (2016); http//hdl.handle.net/1887/ 43072.
- O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems*, edited by G. Hunt and H. E. Payne, ASP Conf. Ser. **125**, 322 (1997); http://cats.sao.tu.
- 41. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, Bull. SAO **58**, 118 (2005).
- http://sundog.stsci.edu/cgi-bin/ searchfirst.
- 43. M. H. Wieringa and P. Katgert, Astron. and Astrophys. **93**, 399 (1992).
- K. M. Blundell, S. Rawlings, S. A. Eales, G. B. Taylor, and A. D. Bradley, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 295, 263 (1998).
- M. J. Crus, M. J Jarvis, M. K. Blundell, S. Rawlings, *et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **373**, 1531 (2006).
- J. W. Broderick, J. J. Bryant, R. W. Hundstead, E. M. Sadler, and T. Murply, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 381, 341 (2007).
- C. De Breuck, R. W. Hunstead, E. M. Sadler, B. Rocca-Volmerange, and I. Klamer, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 347, 837 (2004).
- 48. V. Singh, A. Beelen, Y. Wadadekar, S. Sirothia, *et al.*, Astron. and Astrophys. **569**, id. A52 (2014).
- W. M. Lane, W. D. Cotton, S. van Velzen, T. E. Clarke, N. E. Kassim, J. F. Helmboldt, T. J. W. Lazio, and A. S. Cohen, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 440, 327 (2014).
- H. T. Intema, P. Jagannathan, K. P. Mooley, and D. A. Frail, Astron. and Astrophys. 598, id. A78 (2017).
- I. J. Klamer, D. Hunstead, E. M. Sadler, J. J. Bryant, H. Johnston, J. Broderick, C. De Breuck, and R. D. Ekers, http://kusastro.kyato-u.ac.jp (2013).

- 52. R. Ekers and I. Feain, MWA/GLEAM PowerPoint Presentation, MWA GLEAM Workshop, Perth, 20 Oct. 2014.
- 53. C. G. Bornancini, C. De Breuck, W. de Vries, S. Croft, W. van Breugel, H. Röttgering, and D. Minniti, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **378**, 551 (2007).
- 54. L. M. Ker, B. P. N. Best, E. E. Rigby, H. J. A. Röttgering, and M. A. Gendre, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 420, 2644 (2012).
- 55. http://www.sdss.org/dr12/.
- 56. M. Fioc and B. Rocca-Volmerange, Astron. and Astrophys. **326**, 950 (1997).
- O. V. Verkhodanov, A. I. Kopylov, O. P. Zhelenkova, V. Verkhodanova, V. N. Chernenkov, Yu. N. Parijskij, N. S. Soboleva, and A. V. Temirova, Astron. Astrophys. Trans. 19, 662 (2000).
- R. M. C. Simpson, S. Rawlings, R. Ivison, A. Masayuki, *et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 421, 3060 (2012).
- 59. J. E. Baldwin and P. F. Scott, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **165**, 259 (1973).
- 60. O. B. Slee, C. B. Siegman, I. R. G. Wilson, Australian J. Physics **36**, 101 (1983).
- 61. S. S. Komissarov and A. G. Gubanov, Astron. and Astrophys. **285**, 27 (1994).
- N. S. Soboleva, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, A. V. Temirova, and N. N. Bursov, Astropys. Bull. 65, 42 (2010).
- 63. O. P. Zhelenkova, N. S. Soboleva, E. K. Majorova, A. V. Temirova, Astrophys. Bull. **68**, 26 (2013).
- 64. L. Jiang, X. Fan, Z. Ivezic, G. T. Richards, D. P. Schneider, M. A. Strauss, and B. C. Kelly, Astrophys. J. **656**, 680 (2007).
- 65. A. Sajina, L. Yan, D. Lutz, A. Steffen, *et al.*, Astrophys. J. **683**, 659 (2008).
- 66. S. Tinti and G. De Zotti, Astron. and Astrophys. 445, 889 (2006).
- 67. C. Fanti, Astron. Nachricht. 330, 120 (2009).
- A. E. Kimball and Z. Ivezić, Astron. J. 136, 684 (2008).
- Т. А. Семенова, Кандидатская диссертация (КЧР, пос. Нижний Архыз, Специальная астрофизическая обсерватория РАН, 2009).
- 70. I. Strateva, Z. Ivezić, G. R. Knapp, V. K. Narayanan, *et al.*, Astron. J. **122**, 4 (2001).