

УДК 524.74-77(083.8)

## ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ И СВОЙСТВА РОДИТЕЛЬСКИХ ГАЛАКТИК РАДИОИСТОЧНИКОВ КАТАЛОГА RCR

© 2013 О. П. Желенкова<sup>1</sup>, Н. С. Соболева<sup>2</sup>, Е. К. Майорова<sup>1</sup>, А. В. Темирова<sup>2</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>2</sup>Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 17 мая 2012 года; принята в печать 5 октября 2012 года

По цифровым оптическим обзорам неба SDSS и DPOSS, обзорам инфракрасного диапазона 2MASS, LAS UKIDSS и WISE с использованием радиокарт FIRST и NVSS проведено отождествление радиоисточников каталога RCR, полученного по наблюдательному материалу нескольких циклов эксперимента “Холод”. Для тех источников, у которых не обнаруживались оптические кандидаты в каталогах, проанализированы цифровые изображения в разных фильтрах и суммы изображений SDSS (в фильтрах *gri*), DPOSS (Red, IR), UKIDSS (*JHK*), 2MASS (*JHK*). При выборе оптического кандидата мы опирались на информацию о структуре радиоисточника и фотометрию, а также на спектральные данные, если таковые имелись. Надежно отождествлены 86% радиоисточников, для 8% обнаружены возможные кандидаты, а 6% объектов не отождествилось из-за того, что их родительские объекты оказались слабее предельной глубины используемых обзоров. Немногим более половины отождествлений оказалось галактиками, около четверти квазарами и остальные — объектами, тип которых установить сложно из-за слабости блеска. По полученной зависимости между светимостью и индексом активности в радиодиапазоне сделаны оценки светимости на частотах 1.4 и 3.94 ГГц для тех источников, у которых неизвестно красное смещение. Оказалось, что 3% RCR-радиоисточников относятся к FR I-типу ( $L \lesssim 10^{24}$  Вт/Гц на 1.4 ГГц), 60% к мощным радиогалактикам FR II-типа ( $L \gtrsim 10^{26.5}$  Вт/Гц), а остальные являются источниками промежуточной светимости, среди которых имеются FR I, FR II и смешанные типы FR I-FR II. В отличие от квазаров у галактик при уменьшении плотности потока имеется тенденция снижения светимости. Отметим, что без программных средств и ресурсов виртуальной обсерватории осуществить отождествление было бы весьма проблематично.

Ключевые слова: галактики: активные—галактики: квазары—радиоконтинуум: галактики—каталоги—обзоры

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения радиоисточников на сантиметровых волнах проводятся обычно как поисковые обзоры достаточно больших областей неба или для получения данных об источниках, зарегистрированных в других диапазонах длин волн. Эксперимент “Холод” [1, 2], проведенный на радиотелескопе RATAN-600, относился к первой категории. Поскольку в 80-х годах он был по чувствительности глубже существующих обзоров, то сопоставление с другими радиокаталогами было невозможным. Тогда удалось отождествить только 10% радиоисточников каталога RC (RATAN Cold) [3, 4],<sup>1</sup> в основном с крутыми спектрами, с каталогом UTRAO [5].

<sup>1</sup>Каталог RC получен по наблюдательным данным эксперимента “Холод-80”.

В течение ряда лет выполнялись работы по оптическому отождествлению каталога RC. По фотографическим материалам Паломарского обзора неба POSS-I [6] и фотографическим наблюдениям на 6-м телескопе БТА [7, 8] только для 10% радиоисточников были обнаружены оптические кандидаты. Выборка источников с крутыми спектрами исследовалась отдельно в программе по поиску далеких радиогалактик “Большое Трио” [9] на 6-м телескопе БТА [10–13] и 2.5-м телескопе NOT (Nordic Optical Telescope) [14] с привлечением радиокарт VLA с секундным угловым разрешением.

В конце XX века ситуация кардинально изменилась с появлением каталогов в дециметровом диапазоне NVSS [15] и FIRST [16], на два порядка более глубоких, чем UTRAO. Все объекты обзора “Холод” удалось отождествить с радиоисточниками этих обзоров [17]. Современные цифровые

обзоры неба в оптическом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах на 2–3 звездные величины глубже, чем DSS. Они предоставляют новые, ранее не имевшиеся возможности для исследования радиоисточников сразу в нескольких диапазонах электромагнитного спектра.

С появлением обзора SDSS [18–20] было проведено массовое оптическое отождествление RC-источников в области, пересекающейся с FIRST ( $8^{\text{h}} 11^{\text{m}} \leq \alpha_{2000} \leq 16^{\text{h}} 31^{\text{m}}$ ). Поскольку координаты каталога RC достаточно грубы, то для отождествления использовалась высокая координатная точность дециметровых обзоров, что позволило отождествить с оптическими объектами 70% RC-источников [21, 22]. Этому помогла и другая селекция радиоисточников: вместо объектов с крутыми и ультракрутыми спектрами, как правило отождествляемых с очень слабыми родительскими галактиками, большая часть общих RC и NVSS объектов — источники с нормальными и плоскими спектрами, которые чаще связаны с яркими оптическими объектами.

Для уточнения координат и плотностей потока источников каталога RC были обработаны семь циклов наблюдений, проведенных на RATAN-600 с 1987 по 1999 гг., и выполнена повторная обработка данных 1980–1981 гг. для прямых восхождений  $7^{\text{h}} \leq \alpha_{2000} \leq 17^{\text{h}}$ . В результате был получен каталог RCR (RATAN Cold Revised) [17], и работа по отождествлению радиоисточников обзоров “Холод” была продолжена.

Область каталога RCR пересекается с обзором DPOSS-II [23, 24], SDSS, 2MASS [25, 26], LAS UKIDSS (Large Area Survey of the UKIRT Deep Sky Survey) [27, 28], NVSS и FIRST. Самыми глубокими по пределу оказались те области, где RCR пересекается с седьмым релизом SDSS ( $7^{\text{h}} 57^{\text{m}} \leq \alpha_{2000} \leq 16^{\text{h}} 31^{\text{m}}$ ) и четвертым релизом LAS UKIDSS ( $8^{\text{h}} 18^{\text{m}} \leq \alpha_{2000} \leq 10^{\text{h}} 22^{\text{m}}$  и  $11^{\text{h}} 58^{\text{m}} \leq \alpha_{2000} \leq 13^{\text{h}} 00^{\text{m}}$ ). Доля надежных отождествлений [29, 30] составила от 47% в области RCR, общей с NVSS и DPOSS, до 82% — для SDSS и FIRST, и 86% — для UKIDSS и FIRST. После того, как были опубликованы восьмой релиз данных SDSS и WISE (Wide-Field Infrared Survey Explorer) [31], мы уточнили отождествления слабых источников. Далее мы представляем результаты отождествления 550 RCR-источников и еще 12 источников, которые блендируются диаграммой радиотелескопа.

В статье для вычислений приняты следующие величины космологических параметров:  $H_0 = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$  и  $\Omega_{\Lambda} = 0.73$ .

## 2. ОПТИЧЕСКОЕ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ

При оптическом отождествлении радиоисточников каталога RCR мы использовали всю доступную информацию из цифровых обзоров оптического и инфракрасного диапазонов, не ограничиваясь только кросс-идентификацией списка по базам данных NED, SDSS и VizieR. У радиоисточников, для которых не были обнаружены оптические кандидаты в каталогах, мы сравнивали как изображения в разных фильтрах, так и суммы изображений в двух–трех фильтрах, чтобы получить более глубокие кадры для обнаружения слабых объектов.

Чтобы определить предполагаемое расположение родительской галактики относительно радиоструктуры, мы сначала классифицировали источники по морфологическим типам. Для их определения использовались контурные карты, построенные по изображениям обзора FIRST или NVSS с помощью программного приложения SAOImage DS9 [32], интерактивного атласа неба Aladin [33] и веб-сервиса (<http://www.mrao.cam.ac.uk>). В трудных случаях, когда сложно определить, является ли радиоисточник двойным или двумя точечными, во внимание принимались угловые размеры объекта и отношение угловых размеров по обзорам FIRST и NVSS [34].

Предполагаемое по структуре радиоисточника положение родительской галактики мы называем центром радиоисточника и обозначаем его координаты как  $\alpha_{\text{rad}}$  и  $\delta_{\text{rad}}$ . По составным изображениям радио–оптика выбирается самый близкий к ним оптический кандидат с координатами  $\alpha_{\text{opt}}$  и  $\delta_{\text{opt}}$ .

Отношение максимального правдоподобия используется как эффективная оценка надежности при отождествлениях по координатному совпадению объектов разных диапазонов [35]. При надежности отождествления 97% пороговая величина функции отношения максимального правдоподобия  $L_{\text{cutoff}}$  у нас соответствует  $d_{\text{rad-opt}} \lesssim 3.5''$  для двойных и  $d_{\text{rad-opt}} \lesssim 2''$  — для источников, у которых есть ядро,<sup>2</sup> где  $d_{\text{rad-opt}}$  — расстояние между центром радиоисточника и положением оптического кандидата, выраженное в угловых секундах. Мы использовали эти величины при определении надежного (+) и возможного (?) отождествления.

На Рис. 1 приведены распределения разности оптических и радиокоординат для всех отождествленных радиоисточников и надежно отождествленных точечных источников. Медианная величина  $d_{\text{rad-opt}}$  составляет  $0''.82$  для всех отождествлений,  $0''.43$  — для точечных и  $1''.10$  — для двойных источников.

<sup>2</sup>К таким источникам мы отнесли C (core), CJ (core-jet), CL (core-lobe), T (triple) и DC (double-core) источники.

2.1. Области отождествления и проникаемость обзоров

Характеристики использованных обзоров и каталогов приведены в Таблице 1. Полоса каталога RCR перекрывается с обзором SDSS DR8 в интервале прямых восхождений

$$07^{\text{h}} 53^{\text{m}} \leq \alpha_{2000} \leq 16^{\text{h}} 29^{\text{m}}$$

и с седьмой версией LAS UKIDSS в интервалах

$$08^{\text{h}} 18^{\text{m}} \leq \alpha_{2000} \leq 10^{\text{h}} 20^{\text{m}},$$

$$11^{\text{h}} 09^{\text{m}} \leq \alpha_{2000} \leq 13^{\text{h}} 00^{\text{m}},$$

$$13^{\text{h}} 41^{\text{m}} \leq \alpha_{2000} \leq 15^{\text{h}} 55^{\text{m}}.$$

Глубина обзора DPOSS составляет  $20^{\text{m}}5-21^{\text{m}}$ , а сумма кадров в двух фильтрах по нашей оценке дает  $m_R \sim 21^{\text{m}}2$  эквивалентной звездной величины в фильтре  $R$ . Сумма кадров в фильтрах  $gri$  обзора SDSS имеет предел порядка  $22^{\text{m}}6$ , а сумма кадров в полосах  $H$  и  $K$  обзора UKIDSS —  $22^{\text{m}}8$ . Суммированные кадры добавляют к отождествлениям еще 10–12%.

Прямые снимки обзора WISE по проникаемости эквивалентны  $m_R = 22^{\text{m}}8$ , и он перекрыл те области, где мы ранее работали с обзорами DPOSS и 2MASS. Таким образом глубина используемых изображений составила  $22^{\text{m}}6-22^{\text{m}}8$ , что оказалось достаточным для практически полного отождествления каталога RCR.

Там, где каталог RCR попадает в область обзора FIRST, для классификации источников и их отождествления применялись карты обзора FIRST, а в остальных случаях — карты NVSS. Использование последних из-за более низкого по сравнению с FIRST углового разрешения ухудшает надежность отождествлений.<sup>3</sup> Угловое разрешение обзора FIRST в подавляющем большинстве случаев позволяет делать верные выводы о структуре источника и правильно определять положение родительской галактики. Только три источника каталога RCR<sup>4</sup> мы не смогли уверенно классифицировать по морфологическому типу.

2.2. Подготовка данных

Для работы с 9 обзорами и 11 каталогами в радио, оптическом и инфракрасном диапазонах мы использовали следующие программные приложения: интерактивный атлас неба Aladin,

<sup>3</sup>Для некоторых источников мы использовали карты с более высоким, чем у NVSS, угловым разрешением из архивной системы NRAO (<http://archive.nrao.edu>).

<sup>4</sup>Источники J 082120.4+050049, J 093609.9+050349 и J 153305.2+045037 не удалось классифицировать по картам FIRST.

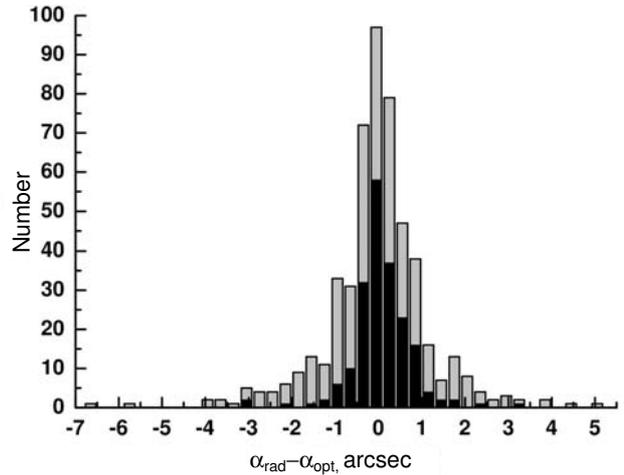


Рис. 1. Распределение разности прямых восхождений предполагаемого центра радиои источника  $\alpha_{\text{rad}}$  и оптического кандидата  $\alpha_{\text{opt}}$  для всех отождествленных источников (серый цвет) и надежно отождествленных точечных источников каталога RCR (черный).

SAOImage DS9, TOPCAT [36] и CasJobs [37]. Aladin имеет удобные средства для гибкой настройки приложения под потребности пользователя в копировании, обработке и визуализации данных. Мы воспользовались ими для автоматизации подготовки данных из используемых астрономических информационных ресурсов.

Информацию из 11 каталогов и таблицу с результатами отождествления мы поместили в базу данных<sup>5</sup> и реализовали веб-интерфейс, который включает визуализацию радиокарт NVSS и FIRST, составные изображения радио–оптика и спектральное распределение энергии в радио, оптике и инфракрасном диапазонах [38]. Окончательное решение об отождествлении мы принимали при сравнении всей информации, отображаемой этой информационной системой, и учитывали координатное совпадение по методике, подробнее описанной в работе [22].

Отметим, что поскольку использовались несколько цифровых обзоров неба и каталогов из радио, оптического и инфракрасных диапазонов, провести оптическое отождествление было бы невозможно без использования информационных и программных ресурсов виртуальной обсерватории, а именно: Aladin, VizieR [39], SAOImage DS9, TOPCAT, CasJobs, NED, SkyView,<sup>6</sup>

<sup>5</sup>Информационная система с результатами отождествления каталога RCR использует систему управления базами данных PostgreSQL.

<sup>6</sup><http://skyview.gsfc.nasa.gov/>.

**Таблица 1.** Характеристики обзоров и каталогов, использовавшихся при отождествлении радиоисточников каталога RCR. Name — каталоги и обзоры; Sp — спектральный диапазон, для радиокаталогов указана частота в МГц, для оптических и инфракрасных обзоров приведено название полосы; Res — угловое разрешение для радиообзоров; ErrPos — ошибки астрометрической привязки; ErrFlux — ошибки определения плотности потока или звездных величин; Limit — предел обнаружения, для радиообзоров — в мЯн, для остальных обзоров — в звездных величинах

Name	Sp	Res	ErrPos	ErrFlux	Limit
VLSS	74 МГц	80''			500 мЯн
TXS	365 МГц	10''			150 мЯн
NVSS	1400 МГц	45''			2.5 мЯн
FIRST	1400 МГц	5''4			1 мЯн
GB6	4850 МГц	3'5			25–37 мЯн
DSS-II	$B_J, R_F, I_N$				20 <sup>m</sup> 5( <i>R</i> )
	$B + R + I$				21 <sup>m</sup> 2( <i>R</i> )
SDSS	$u, g, r, i, z$		±0''1		22 <sup>m</sup> 0, 22 <sup>m</sup> 2, 22 <sup>m</sup> 2, 21 <sup>m</sup> 3, 20 <sup>m</sup> 5
	$g + r + i$				22 <sup>m</sup> 6( <i>R</i> )
USNO-B1	$B_O, R_E, B_J, R_F, I_N$		±0''2	±0 <sup>m</sup> 3	$V = 21^m$
GSC 2.3.2	$B_J, R_F, I_N$		±0''3	±0 <sup>m</sup> 2	$R_F = 20^m$
2MASS	$J, H, K$		±0''2	10%	15 <sup>m</sup> 8, 15 <sup>m</sup> 1, 14 <sup>m</sup> 3
LAS UKIDSS	$Y, J, H, K$		±0''1		20 <sup>m</sup> 5, 20 <sup>m</sup> 0, 18 <sup>m</sup> 8, 18 <sup>m</sup> 4
	$H + K$				22 <sup>m</sup> 8( <i>R</i> )
WISE	$W1, W2, W3, W4$				

WSA-WFCAM Science Archive,<sup>7</sup> NASA/IPAC Infrared Science Archive<sup>8</sup> и архива данных NRAO.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ

Надежным отождествлением радиоисточника мы считаем объект из оптического или инфракрасного каталога, обнаруживаемый в пределах пороговой разности координат (см. выше). Если объект отсутствует в каталогах, но обнаруживается на двух изображениях в разных фильтрах и совпадает по координатам, то мы также считаем такой объект надежным отождествлением. К возможному отождествлению относится отождествление, когда объект определяется на изображении в одном фильтре (?1) или, если структуру источника мы не можем уверенно классифицировать (?s) по имеющимся радиокартам. Пустое поле или (EF) — это отсутствие объекта в области поиска из-за

недостаточной проникающей глубины оптического или инфракрасного обзора.

Из 562 источников каталога RCR 272 (48%) отождествлены в этой работе впервые. Для остальных отождествление проводится повторно, поскольку для части RCR-источников, которые есть в каталоге RC, уже были обнаружены оптические объекты [8, 21]. 182 источника каталога RCR имеют отождествления в базе данных SDSS.<sup>9</sup>

В область обзора FIRST попадают 467 источников каталога RCR. Из них 56% оказались однокомпонентными, 28% — двухкомпонентными, источников с тремя и более компонентами — 15%, и 1% — протяженные слабые объекты, которые отсутствуют в FIRST, но имеются в обзоре

<sup>9</sup>Источники J 094545.9+043525, J 125554.7+045339, J 142916.6+050121, J 160509.6+045839 ошибочно отождествлены в базе данных SDSS с яркими объектами, хотя более достоверным является отождествление с соседними слабыми объектами, которые отсутствуют в каталоге SDSS.

<sup>7</sup><http://surveys.roe.ac.uk/wsa/index.html>.

<sup>8</sup><http://irsa.ipac.caltech.edu/>.

NVSS.<sup>10</sup> Доля многокомпонентных источников в каталоге RCR получилась выше, чем в обзоре FIRST, в котором она при  $S_{\text{lim}} = 1$  мЯн на 1.4 ГГц оценивается в 10% [40]. Это отличие объясняется тем, что RCR-источники ярче. Каталог RCR имеет полноту 90% для источников с плотностью потока  $S \geq 15$  мЯн на 3.94 ГГц [17], что соответствует  $S \sim 28$  мЯн на частоте 1.4 ГГц при медианной величине спектрального индекса  $\alpha \sim -0.6$ .

Доля уверенных отождествлений (+) однокомпонентных источников составила 89%, 6% — возможные отождествления (?), и в 5% случаев ничего не обнаружено (EF). Для двухкомпонентных источников получилось: (+) — 90%, (?) — 1%, (EF) — 5%. Источники с тремя и большим числом компонент отождествляются полностью, т.е. доля уверенных отождествлений составляет 97%, и возможных — 3%. У половины многокомпонентных источников известны красные смещения при медианной величине  $Z \sim 0.35$ .

Для 467 RCR-источников проведена морфологическая классификация по картам обзора FIRST. Точечных (C) и двойных (D) источников оказалось поровну (по 42%), а с морфологией “ядро-выброс” (CJ), “ядро-компоненты” (CL), “тройной” (T) и “диффузный” (E) — немногим меньше пятой части (16%). Не исключено, что источники C- и D-типов в действительности могут иметь другую структуру. Однако, это можно проверить только по данным с более высоким угловым разрешением, чем у обзора FIRST.

Свойства и статистика отождествлений по морфологическим типам источников приведены в Таблице 2, где есть сведения о количестве источников, процентной доле отождествлений, а также доле галактик, квазаров и объектов неопределенного типа для каждой группы источников. Проанализирован состав источников с инверсными, плоскими, крутыми и ультракрутыми спектрами по спектральному индексу на частоте 3.94 ГГц. Заметная доля инверсных спектров наблюдается у точечных источников и с морфологией CL, а ультракрутых спектров — у точечных и двойных.

Оказалось, что у источников, которые относятся к CJ-типу, самый низкий индекс активности в радиодиапазоне, а у двойных — самый высокий по сравнению со остальными. Источники CL-типа по морфологии и радиосветимости относятся к типу FRI [41]. По имеющимся красным смещениям для источников CJ, T и CL-типов можно отметить, что последние оказались самыми близкими по сравнению с другими.

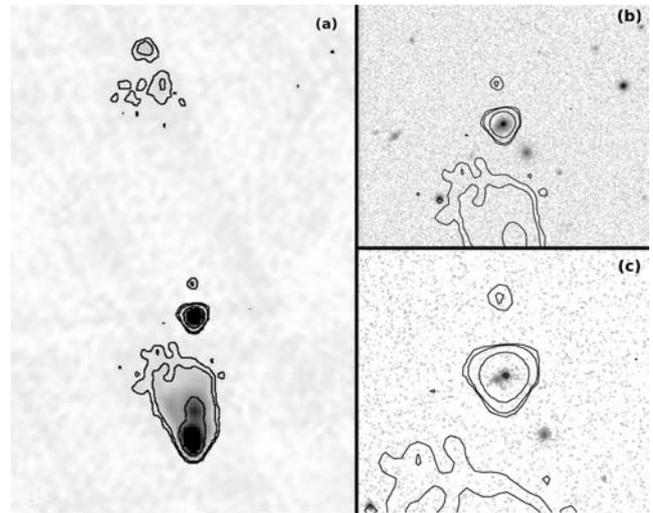


Рис. 2. Тройной источник J091401.98+050707.8: (a) — полутонное и контурное изображение из обзора FIRST; (b) — полутонное изображение центральной части радиоисточника в фильтре  $r$  (SDSS) с наложенными радиоконтурными (размер области  $2' \times 2'$ ); (c) — в фильтре  $H$  (LAS UKIDSS) отождествленный объект оказался двойным.

Особенности структуры радиоисточника могут указывать на повторную активность ядра в радиодиапазоне. К таким объектам относят тройные источники [42], “double-double” [43] и “winged” [44, 45]. В каталоге RCR источников с похожей структурой оказалось около 13%. На Рис. 2 приведен для примера радиоисточник J091401.98+050707.8, классифицированный как тройной. Его отождествление связано с объектом, который на кадрах LAS UKIDSS оказался двойным. Скорее всего, это — взаимодействующие галактики. Еще 3% можно отнести к “старым” источникам, у которых на картах FIRST слабые протяженные компоненты без уярчений, что может свидетельствовать о прекращении “подпитки” радиокомпонентов.

Результаты отождествления радиоисточников каталога RCR представлены в информационной системе.<sup>11</sup> Для 188 отождествленных радиоисточников в работах [46, 47] и базах данных SDSS DR8 и NED имеются спектральные и фотометрические красные смещения. Поскольку таблица с результатами отождествления<sup>12</sup> включает 60 колонок, мы приводим далее только описание колонок. В круглых скобках идет порядковый номер колонки, затем название колонки и ее описание.

(1) RCRJ — имя источника по каталогу RCR.

<sup>10</sup>Источники J081848.3+045354, J112339.1+045553, J144257.6+045325 и J151054.6+045410 отсутствуют в обзоре FIRST.

<sup>11</sup><http://www.sao.ru/fetch/cgi-bin/SkyObj/rcrn.cgi>.

<sup>12</sup>Таблица с результатами отождествления радиоисточников находится по адресу <http://www.sao.ru/hq/zhe/RCRoiRes.html>.

**Таблица 2.** Результаты оптического отождествления радиисточников каталога RCR по морфологическим типам. Type — морфологический тип радиисточника: C — core, CJ — core-jet, CL — core-lobe, D — double, T — triple;  $N_{\text{obj}}$  — количество объектов, в скобках приведено количество объектов с известным спектральным или фотометрическим красным смещением; (+) — надежные отождествления; (?) — возможные отождествления; (EF) — пустые поля;  $d_{\text{rad-opt}}$  — медианное расстояние между предполагаемым положением родительской галактики, определенным по структуре радиисточника, и координатами выбранного оптического объекта; Galaxies — галактики; QSO — квазары; Unknown — неопределенный тип; IS — источники с инверсионными спектрами ( $\alpha_{3.94 \text{ ГГц}} > 0.1$ ;  $F \propto \nu^\alpha$ ); FS — источники с плоскими спектрами ( $-0.5 < \alpha_{3.94 \text{ ГГц}} \leq 0.1$ ); SS — источники с крутыми спектрами ( $SS, -1 < \alpha_{3.94 \text{ ГГц}} \leq -0.5$ ); USS — источники с ультракрутыми спектрами ( $\alpha_{3.94 \text{ ГГц}} \leq -1$ );  $R_r$  — индекс активности в радиодиапазоне, приведена медианная величина, как и в следующих двух колонках;  $\log L$  — логарифм светимости ( $L$  — в Вт/Гц) на частоте 1.4 ГГц;  $Z$  — красное смещение

Type	$N_{\text{obj}}$	(+), %	(?), %	(EF), %	$d_{\text{rad-opt}}$ , arcsec	Galaxies, %	QSO, %	Unknown, %	IS, %	FS, %	SS, %	USS, %	$R_r$	$\log L$	$Z$
C	193 (56)	89	5	6	0.43	40	34	26	19	36	34	11	3.7	26.9	0.89
CJ	19 (9)	84	16	—	1.26	26	47	27	—	69	26	5	3.3	26.9	0.76
CL	17 (12)	94	—	6	1.04	82	12	6	12	35	53	—	2.1	24.9	0.18
D	193 (58)	94	2	4	1.10	60	19	21	2	19	57	22	4.0	27.0	0.58
T	43 (24)	98	2	—	0.75	56	35	9	5	28	62	5	3.0	26.4	0.47

(2) RCJ — имя источника по каталогу RC.

(3) com — комментарий. Символом “b” отмечены бленды; “d” — широкие двойные источники, которые разделяются диаграммой PATAH-600, “S” — источник из выборки с ультракрутыми спектрами.

(4)  $\alpha_{\text{rad}}$ , (5)  $\delta_{\text{rad}}$  — координаты на эпоху 2000.0 центра радиисточника, который определялся по морфологическому типу источника по картам обзора FIRST или NVSS.

(6)  $\Delta H$  — расстояние от центрального сечения диаграммы.

(7)  $N_{\text{comp}}$  — число компонентов радиисточника по каталогу FIRST. Отметим, что если число компонентов нулевое, то тогда источник есть в NVSS, но отсутствует в FIRST.

(8) Morph. — морфологический тип радиисточника, а именно: C — точечный; CJ — ядро-выброс; CL — источник с ярким ядром и компонентами; T — тройной; D, DD, DC — двойные источники; E — протяженный. Строчными буквами обозначен тип источника, определенный по картам NVSS.

(9)  $S_V$  — плотность потока на частоте 74 МГц из каталога VLSS. Здесь и далее плотности потока приведены в Янских.

(10)  $S_T$  — плотность потока на 365 МГц из каталога TXS.

(11)  $S_N$ , (12)  $t_N$  — плотность потока и АВ-величина на 1.4 ГГц из NVSS.

(13)  $S_R$ , (14)  $t_R$  — плотность потока и АВ-величина на частоте 3.94 ГГц из RCR.

(15)  $S_G$  — плотность потока на 4.85 ГГц из GB6.

(16) Id — оптическое отождествление. (+) — надежное отождествление, (?) — возможное отождествление, (EF) — пустое поле. Значком (\*) отмечено смещенное относительно радиокординат центра источника положение оптического объекта.

(17)  $\alpha_{\text{opt}}$ , (18)  $\delta_{\text{opt}}$  — координаты оптического объекта и на эпоху 2000.0.

(19) Type — тип оптического объекта. QSO и qso — квазар, G и g — галактика. Прописными буквами обозначены объекты, у которых, кроме классификации по SDSS, тип еще подтверждается в базе данных NED. Знак (?) отмечает неуверенную классификацию.

(20)  $Z$  — красное смещение. В колонке (21) sp символом (+) отмечены спектральные  $Z$ .

(22) ObjId — идентификатор объекта в обзоре SDSS.

(23)  $u$ , (24)  $\text{err}_u$  — звездная величина в фильтре  $u$  и ошибка.

(25)  $g$ , (26)  $\text{err}_g$  — звездная величина в фильтре  $g$  и ошибка.

(27)  $r$ , (28)  $\text{err}_r$  — звездная величина в фильтре  $r$  и ошибка. Для слабых объектов приведена оценка звездной величины, что отмечено значком (:) в колонке (29)  $l_r$ .

- (30)  $i$ , (31)  $\text{err}_i$  — звездная величина в фильтре  $i$  и ошибка.  
 (32)  $z$ , (33)  $\text{err}_z$  — звездная величина в фильтре  $z$  и ошибка. Отметим, что звездные величины приведены с учетом поглощения.  
 (34)  $\text{ext}_u$ , (35)  $\text{ext}_g$ , (36)  $\text{ext}_r$ , (37)  $\text{ext}_i$ , (38)  $\text{ext}_z$  — поглощение в фильтрах  $ugriz$ .  
 (39)  $R_r$  — индекс активности в радиодиапазоне.  
 (40)  $M_r$  — абсолютная звездная величина в фильтре  $r$  (для объектов с известным красным смещением).  
 (41)  $Y$ , (42)  $\text{err}_Y$  — звездная величина и ошибка в фильтре  $Y$ .  
 (43)  $J$ , (44)  $\text{err}_J$  — звездная величина и ошибка в фильтре  $J$ .  
 (45)  $H$ , (46)  $\text{err}_H$  — звездная величина и ошибка в фильтре  $H$ .  
 (47)  $K$ , (48)  $\text{err}_K$  — звездная величина и ошибка в фильтре  $K$ . Для слабых объектов приведена оценка звездной величины, что отмечено значком ( $:$ ) в колонке (49)  $l_K$ .  
 (50)  $W1$ , (51)  $\text{err}_W1$  — звездная величина и ошибка в фильтре  $W1$  обзора WISE.  
 (52)  $W2$ , (53)  $\text{err}_W2$  — звездная величина и ошибка в фильтре  $W2$  обзора WISE.  
 (54)  $W3$ , (55)  $\text{err}_W3$  — звездная величина и ошибка в фильтре  $W3$  обзора WISE.  
 (56)  $W4$ , (57)  $\text{err}_W4$  — звездная величина и ошибка в фильтре  $W4$  обзора WISE.  
 (58)  $\log L_{0.5}$ , (59)  $\log L_{1.4}$  и (60)  $\log L_{3.94}$  — логарифм светимости (светимость — в Вт/Гц) на частотах 0.5, 1.4 и 3.94 ГГц. Для тех объектов, у которых не известно красное смещение, приводится оценка светимости.

#### 4. РОДИТЕЛЬСКИЕ ГАЛАКТИКИ RCR-РАДИОИСТОЧНИКОВ

По фотометрическим данным проведена классификация объектов, с которыми отождествились RCR-источники. Сначала мы разделили эти объекты на разрешаемые (галактики) и неразрешаемые (звездные объекты), пользуясь классификацией SDSS, которая уверенно проводится при  $r \lesssim 21^m5$  или  $i \lesssim 21^m3$ , а затем уточнили классификацию по нескольким селекционным критериям для цветовых индексов из обзоров SDSS, 2MASS, LAS UKIDSS и WISE.

##### 4.1. Квазары

Поиски радиозвезд в обзоре FIRST привели к обнаружению Хелфандом и др. [48] всего 26,

а Тягараяном и др. [49] — 37 объектов. Почти вся область каталога RCR располагается достаточно далеко от галактической плоскости. Тем не менее, для неразрешаемых в SDSS объектов с  $i < 21^m3$ , а также для объектов, которые не попадают в область обзора SDSS, мы провели сравнение показателей цвета по данным SDSS, 2MASS, LAS UKIDSS и WISE, используя селекционные критерии для квазаров и внегалактических объектов из работ [50–53], чтобы убедиться, что среди них нет звезд.

Показатели цвета квазаров для фильтров  $ugriz$ <sup>13</sup> и  $JHK$  соответствуют следующим критериям:

$$(u - g) < 0.8; -0.2 < (g - r) < 0.6, \quad (1)$$

$$(J - K_s) > 1.2; (r - z) < 0.8. \quad (2)$$

Внегалактические объекты имеют цвета:

$$(H - K_s) > 0.3, \quad (3)$$

$$K_s > 1.5 + 0.75(g - i). \quad (4)$$

Селекционные критерии для квазаров, включающие полосы  $W1, W2$  обзора WISE (в фотометрической системе Веги) и данные SDSS (AB-система), взяты из работы Ву и др. [53]:

$$(W1 - W2) > 0.57, \quad (5)$$

$$(z - W1) > 0.66(g - z) + 2.01. \quad (6)$$

Для звездных объектов мы дополнительно проверили величины собственных движений по каталогу USNO-B1, которые в пределах ошибок измерений<sup>14</sup> не обнаружены для проверяемых объектов.

Таким образом, 125 звездных объектов<sup>15</sup> были отнесены к квазарам. Для половины из них извест-

<sup>13</sup>В работе [52] ограничения приводятся для  $i < 19^m1$ , мы использовали его до  $i < 21^m3$ .

<sup>14</sup>У оптического кандидата радиоисточника J135621.48+050050.3 собственное движение, по данным каталога USNO-B1, оказалось значительным ( $\mu_\alpha = 0''.084$  в год и  $\mu_\delta = -0''.336$  в год). Координаты объекта, измеренные на изображениях POSS-II и SDSS, эпохи наблюдений которых различаются на 20 лет, совпадают. Таким образом в каталоге приведена ошибочная величина собственного движения.

<sup>15</sup>Оптический объект, отождествившийся с радиоисточником J142848.30+050629.1, в базе данных SDSS DR8 имеет спектр, правда с высоким уровнем шума, по которому он классифицируется как звезда класса K3. Этот объект имеет признаки SERENDIP\_FIRST и QSO\_MAG\_OUTLIER. Первый означает, что цель совпадает с радиоисточником обзора FIRST, но его звездная величина слабее, чем установлено селекционным критерием квазаров. Второй признак приписывается звездным объектам, когда они слишком слабые или слишком яркие, чтобы получить качественную спектроскопию. Мы также отнесли этот объект к квазарам.

**Таблица 3.** Три группы родительских галактик радиисточников каталога RCR. red — группа галактик ранних типов, blue — галактики поздних типов, QSO — квазары.  $N_{\text{obj}}$  — количество источников, в скобках указано количество объектов с известными  $Z_{\text{sp}}$  или  $Z_{\text{phot}}$ ;  $S$  — плотность потока на 3.94 ГГц (для колонок с 3 по 9 для параметров приводятся медианные величины);  $\alpha$  — спектральный индекс на 3.94 ГГц;  $m_r$  — звездная величина в фильтре  $r$ ;  $R_r$  — индекс активности в радиодиапазоне;  $Z$  — красное смещение (для колонок с 7 по 9 характеристики приводятся для радиисточников с известными красными смещениями);  $M_r$  — абсолютная величина в фильтре  $r$ ;  $\log L$  — логарифм светимости ( $L$  — в Вт/Гц) на частоте 1.4 ГГц

Sample	$N_{\text{obj}}$	$S$ , мЯн	$\alpha$	$m_r$ , mag	$R_r$	$Z$	$M_r$ , mag	$\log L$
red	25 (19)	35	-0.5	16.3	1.8	0.12	-22.7	24.5
blue	10 (6)	51	-0.7	21.1	3.3	0.05	-20.6	25.6
QSO	125 (65)	41	-0.4	20.0	3.3	1.36	-25.6	27.0

ны спектральные или фотометрические красные смещения.

#### 4.2. Галактики

Распределение SDSS-галактик на двухцветной диаграмме  $(g-r)-(u-g)$  имеет два максимума, соответствующие галактикам ранних типов (E, S0 и Sa) и галактикам поздних типов (Sb, Sc и Irr). К ранним типам относятся объекты, у которых показатель цвета  $(u-r) \gtrsim 2^{\text{m}22}$ , а к поздним с  $(u-r) \lesssim 2^{\text{m}22}$ . Это разделение сохраняется до  $Z \sim 0.4$  [54], при этом галактики поздних типов локализируются в области  $0 \lesssim (u-g) \lesssim 1.6$  и  $-0.1 \lesssim (g-r) \lesssim 1$ , а ранних — в  $1.7 \lesssim (u-g) \lesssim 2.4$  и  $0.6 \lesssim (g-r) \lesssim 1.3$ . Для обоих типов еще использовались ограничения:  $0.1 \lesssim (r-i) \lesssim 0.65$  и  $-0.05 \lesssim (i-z) \lesssim 0.5$ . Так, из отождествленных галактик в группу галактик поздних типов отнесено 10 объектов, ранних — 25. Последние на двухцветной диаграмме  $(g-r)-(r-i)$  попадают в область локализации звезд поздних спектральных классов (см. диаграммы из работ [50, 51]). Это может быть связано с тем, что в оптической светимости этой группы галактик преобладает вклад звездного населения, что вместе со сравнительно низкой радиосветимостью говорит о невысокой активности ядра.

Отметим, что при  $(W1 - W2) > 0.8$  [55] источники относятся к внегалактическим. Применяя это условие и критерий (5) к тем отождествлениям, тип которых не определяется из-за слабости блеска в полосах  $ugriz$  и  $HK$ , мы получили, что 34 из 103 таких родительских объектов можно отнести к внегалактическим.

Параметры галактик ранних и поздних типов, а также квазаров, приведены в Таблице 3.

#### 5. ОЦЕНКА РАДИОСВЕТИМОСТИ RCR-ИСТОЧНИКОВ

Для радиисточников каталога мы вычислили индекс активности в радиодиапазоне по следующей формуле<sup>16</sup> [34]:

$$R_r = 0.4(m_r - t_N), \quad (7)$$

где  $m_r$  — звездная величина в SDSS фильтре  $r$  (с учетом галактического поглощения),  $t_N$  — плотность потока, выраженная в звездных величинах. Перевод плотности потока в звездную величину в фотометрической системе AB производился по формуле:

$$t_N = -2.5 \log(S_N/3631 \text{ Ян}), \quad (8)$$

где  $S_N$  — плотность потока из обзора NVSS. Радиосветимость на 1.4 ГГц с учетом  $k$ -поправки вычислялась по следующей формуле [56]:

$$L_\nu = 4\pi D_L^2 (1 + Z)^{(-\alpha-1)} S_\nu, \quad (9)$$

где  $D_L$  — фотометрическое расстояние,  $Z$  — красное смещение,  $S_\nu$  — наблюдаемая плотность потока на частоте в системе координат источника. Мы оценили радиосветимости (в Вт/Гц) на частоте 1.4 ГГц для 54 квазаров и 57 галактик с известными спектральными красными смещениями. Наблюдаемые плотности потока и спектральные индексы аппроксимировались по спектрам источников RCR (<http://www.sao.ru/hq/len/RCR/>) с помощью пакета `spg`.

На Рис. 3 представлена связь между индексом  $R_r$  и логарифмом радиосветимости  $L$  на частоте 1.4 ГГц для RCR-источников. Аппроксимация линейной

<sup>16</sup>В работе Кимбалла и Ивезича [34] объекты с  $R_r > 1$  относят к активным в радиодиапазоне, то есть к тем, у которых основной вклад в интегральное радиоизлучение дает активное ядро. Источников с  $R_r < 1$  в каталоге RCR оказалось 2%.

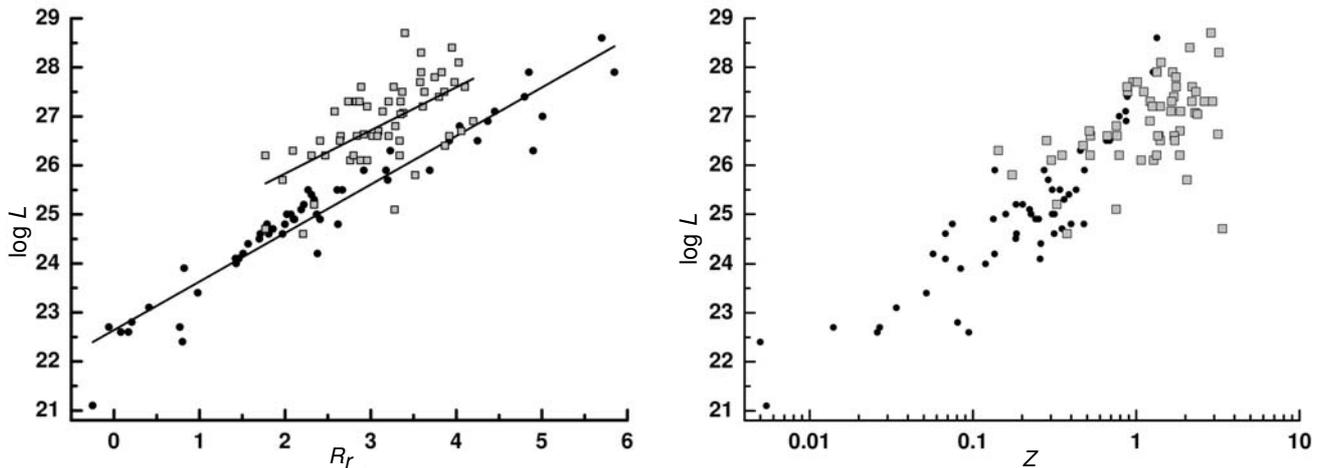


Рис. 3. Слева — связь индекса активности в радиодиапазоне  $R_r$  и радиосветимости  $\log L$  на частоте 1.4 ГГц ( $L$  — в Вт/Гц) для 55 галактик (кружки) и 57 квазаров (квадратики) с известными спектральными красными смещениями. Нижняя линия — линейная зависимость логарифма радиосветимости от индекса  $R_r$  для радиогалактик, верхняя — для радиоквазаров. Справа — для тех же источников распределение  $\log L$  при росте красного смещения.

функцией этой зависимости для радиогалактик имеет вид:

$$\log L = 22.64(\pm 0.11) + 0.99(\pm 0.04)R_r. \quad (10)$$

Среднеквадратичное отклонение точек от аппроксимирующей линейной функции составляет около 0.3. Для радиоквазаров, у большинства из которых радиосветимость оказывается выше, чем у радиогалактик с тем же индексом  $R_r$ , мы также получили линейную зависимость с близким наклоном, но с большим в два раза разбросом точек, чем у галактик:

$$\log L = 24.07(\pm 0.048) + 0.88(\pm 0.15)R_r. \quad (11)$$

По этим формулам произведены оценки радиосветимости галактик и квазаров, у которых красные смещения не определены. Для оценки светимости тех RCR-источников, которые отождествились со слабыми объектами или для которых оптические объекты не обнаружены,<sup>17</sup> мы аппроксимировали зависимость  $R_r$ – $\log L$  по всем объектам с известными спектральными  $Z$ , не разделяя их по типам:

$$\log L = 22.82(\pm 0.19) + 1.12(\pm 0.06)R_r. \quad (12)$$

Обычно величина  $L \lesssim 10^{24}$  Вт/Гц на частоте 1.4 ГГц используется в качестве разделительной границы между FR I и FR II-типами радиоисточников, хотя она зависит от яркости родительской галактики в оптическом диапазоне и растет при увеличении абсолютной звездной величины [57]. При

$L \lesssim 10^{24}$  Вт/Гц источники, в основном, относятся к FR I-типу, при  $L \gtrsim 10^{26.5}$  Вт/Гц — к FR II-типу, при промежуточных светимостях встречаются как FR I, так и FR II, а также смешанные FR I-FR II-типы. Так по произведенным оценкам светимости  $L$  среди RCR-источников оказалось всего около 3% FR I, промежуточной светимости — 37%, мощных радиоисточников FR II-типа — 60%.

### 5.1. Три выборки RCR-источников

Чувствительность диаграммы направленности РАТАН-600 падает от центра к краям. В центральной части диаграммы наблюдаются более слабые источники, а сильные регистрируются и на краю поля зрения. По этой причине выделяются три полосы обзора, разные по предельной чувствительности. Яркие источники с  $S > 60$  мЯн (выборка I) на 3.94 ГГц регистрируются в полосе шириной около  $48'$ , источники с плотностями потока  $20 \text{ мЯн} < S \leq 60 \text{ мЯн}$  (выборка II) — в полосе примерно  $24'$ , и  $S \leq 20 \text{ мЯн}$  (выборка III) — в полосе примерно  $12'$ , при этом площадь покрытия получается 120, 60 и  $30^\circ$  соответственно. В Таблице 4 приведены сравнительные данные для этих трех выборок.

С уменьшением плотности потока на частоте 3.94 ГГц количество оптических отождествлений снижается от 96% для выборки (I) до 78% в выборке (III). Спектры радиоисточников, в среднем, становятся более плоскими. Соотношение источников с крутыми и плоскими спектрами в выборках

<sup>17</sup>Для источников, у которых оптический кандидат по сумме кадров обзора не обнаружен, в качестве оценки верхнего предела звездной величины для SDSS мы брали  $m_r \sim 22^m 6$  и  $22^m 8$  — для LAS UKIDSS.

**Таблица 4.** Сравнение трех выборок радиоисточников каталога RCR. I — выборка источников с  $S > 60$  мЯн на 3.94 ГГц, II —  $20 \text{ мЯн} < S \leq 60$  мЯн, III —  $S \leq 20$  мЯн.  $N_{\text{obj}}$  — количество источников, в скобках приведено количество источников с известным  $Z$ ; (+) — надежные отождествления; (?) — возможные отождествления; (EF) — пустые поля;  $\alpha$  — медианная величина спектрального индекса на 3.94 ГГц ( $S \propto \nu^\alpha$ ); IS — источники с инверсными спектрами; FS — источники с плоскими спектрами; SS — источники с крутыми спектрами; USS — источники с ультракрутыми спектрами;  $S_R$  — медианная величина плотности потока на 3.94 ГГц (далее приведены медианные величины);  $S_N$  — плотность потока на 1.4 ГГц;  $R_r$  — индекс активности в радиодиапазоне;  $M_r$  — абсолютная звездная величина в SDSS-фильтре  $r$ ;  $\log L$  — логарифм светимости ( $L$  — в Вт/Гц) на частоте 1.4 ГГц (для источников с известными красными смещениями)

Sample	$N_{\text{obj}}$	+	?	EF	$\alpha$	IS	FS	SS	USS	$S_R$ , мЯн	$S_N$ , мЯн	$R_r$	$M_r$	$\log L$
I	148 (79)	96	3	1	-0.8	9	47	33	11	119	236	3.9	-22.8	27.5
II	229 (61)	88	6	6	-0.6	8	49	37	6	31	53	3.7	-22.9	26.6
III	167 (32)	78	14	8	-0.4	22	33	41	4	14	21	3.3	-22.7	25.9

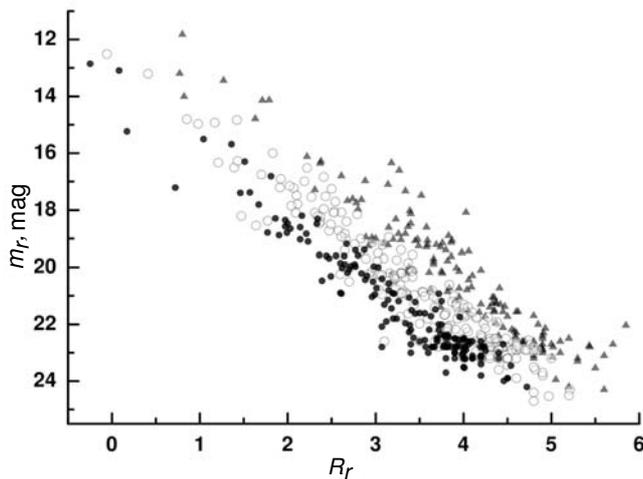
сохраняется, хотя для слабых источников (выборка III) доля инверсных спектров в 2–2.5 раза больше, чем в первых двух более ярких выборках. На Рис. 4 приведено изменение индекса активности в радиодиапазоне  $R_r$  в зависимости от звездной величины в полосе  $r$  (с учетом межзвездного поглощения) для этих трех выборок. Как видно из Рис. 4, чем ниже плотность потока выборки радиоисточников, тем слабее в оптике родительские галактики и ниже индекс активности  $R_r$ . Если экстраполировать величину индекса  $R_r$  при снижении плотности потока на 3.94 ГГц, то на  $S \lesssim 10$  мЯн количество радиоисточников FR I-типа со сравнительно низ-

кой светимостью  $L \lesssim 10^{24}$  Вт/Гц будет сравнимо с количеством источников высокой светимости.

## 6. СРАВНЕНИЕ РАДИОГАЛАКТИК И РАДИОКВАЗАРОВ

Объединенная модель галактик с активными ядрами (AGN) была предложена Урри и Падовани [58] для объектов оптического диапазона и Джексоном и Уоллом [59] для радиообъектов. В ядре галактики располагается “центральная машина” — вращающаяся сверхмассивная черная дыра (ЧД) и аккреционный диск. Аккреция и магнитогидродинамические процессы приводят к генерации излучения диском и к формированию джета. Если направление джета совпадает с лучом зрения, то наблюдатель видит квазар, если он в картинной плоскости, то галактику, при промежуточных положениях джета — разнообразные вариации наблюдательных проявлений AGN. Масса ЧД, ее спин, темп аккреции определяют степень активность ядра [60, 61], включая и фазу радиоисточника. Радиогалактики и радиоквезары имеют более массивные центральные ЧД, более высокий темп аккреции, чем радиоспокойные галактики [62–64]. У квазаров основной вклад в блеск объекта в оптическом и ИК диапазоне дает аккреционный диск, в радиогалактиках — звездное население.

По фотометрическим и спектральным данным мы разделили родительские объекты 424 отождествленных RCR-источников на галактики (290 объектов) и квазары (134). У большей части этих радиоисточников красные смещения определены в обзоре SDSS, что определяет ограниченность нашей выборки с известными  $Z$ , так как большинство галактик попадает в диапазон  $0.01 \lesssim Z \lesssim 0.75$  с медианной величиной  $Z = 0.36$ , а



**Рис. 4.** Соотношение индекса  $R_r$  и звездной величины в фильтре  $r$  для трех выборок радиоисточников каталога RCR. Кружками обозначены источники с плотностью потока на частоте 3.9 ГГц до 20 мЯн включительно, полыми кружками — от 20 до 60 мЯн, и треугольниками — более 60 мЯн.

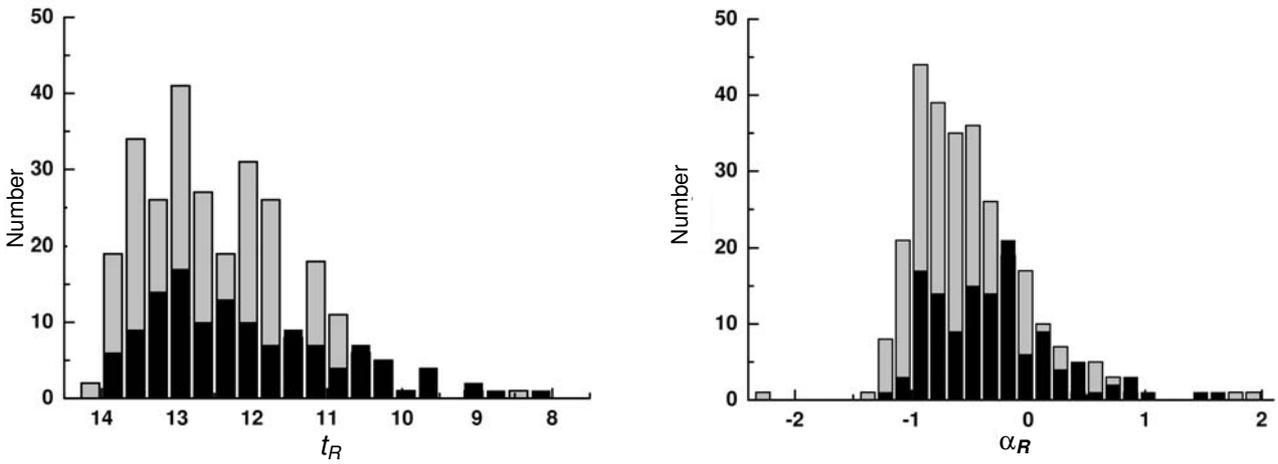


Рис. 5. Слева — распределение плотности потока  $t_R$  на частоте 3.94 ГГц, выраженной в звездных величинах в системе АВ, для галактик (серый цвет) и квазаров (черный цвет); справа — распределение спектральных индексов  $\alpha_R$  на той же частоте.

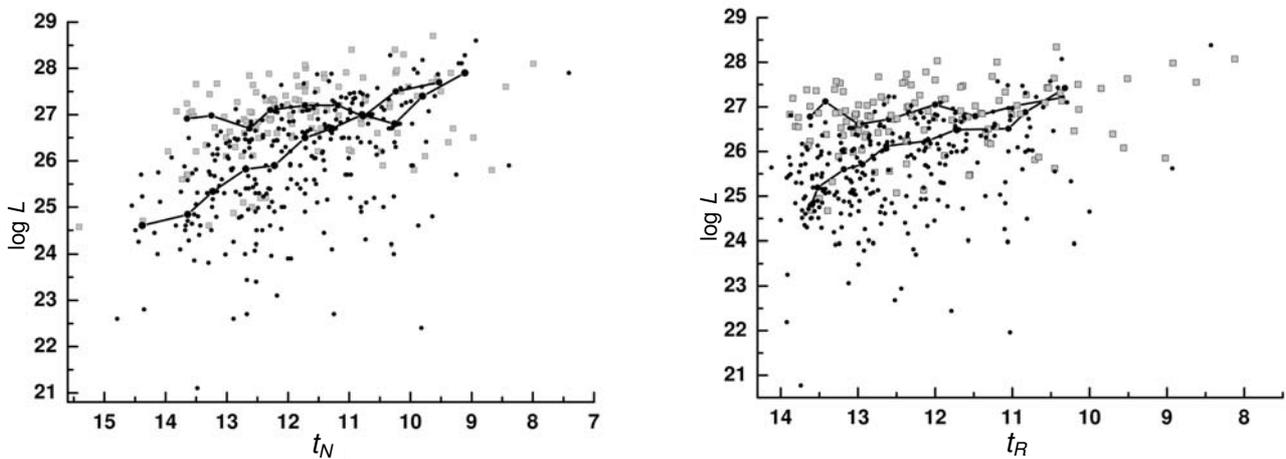


Рис. 6. Изменение светимости  $\log L$  ( $L$  — в Вт/Гц) для 424 источников каталога RCR (галактики — кружки, квазары — квадратики) с изменением плотности потока  $t_N$  (в звездных величинах в системе АВ). Слева — на излученной частоте 1.4 ГГц; справа — на частоте 3.94 ГГц. Ломаными линиями показано поведение медианной величины  $\log L$  для бинов по  $0.4^m$ , а для крайних точек — по  $2^m$ . Верхняя линия — для квазаров, нижняя — для галактик.

квазары — в  $0.02 \lesssim Z \lesssim 3$  с медианной величиной  $Z = 1.40$ .<sup>18</sup>

На Рис. 5 слева приведено распределение квазаров и галактик по плотности потока  $t_R$  на частоте 3.94 ГГц, выраженной в звездных величинах системы АВ, а справа — распределение спектрального индекса для тех же объектов. Для ярких источников, у которых  $t_R \lesssim 11^m$ , обзор “Холод” имеет недостаточную площадь, а для сла-

бых  $t_R \gtrsim 13.5^m$  — недостаточную чувствительность. Отметим, что в интервале  $11^m \lesssim t_R \lesssim 13.5^m$  (или от 15 мЯн до 150 мЯн), где выборка по плотности потока является полной, треть родительских объектов является квазарами, и две трети — галактиками.

Распределение спектральных индексов получилось следующим: 17%, 48%, 28% и 7% для галактик, и 7%, 33%, 48%, 12% — для квазаров, что соответствует ультракрутым, крутым, плоским и инверсным спектрам. У галактик чаще наблюдаются крутые спектры, у квазаров — плоские, хотя в обеих группах присутствуют и другие типы спектров.

<sup>18</sup>Самые далекие объекты — квазар с широкими абсорбционными линиями J083925.60+045419.3 с  $Z = 3.381$  и GPS-блазар J161637.49+045932.8 с  $Z = 3.215$ . Из галактик самый далекий источник — J093632.02+042210.8 (3С 222) с  $Z = 1.339$ .

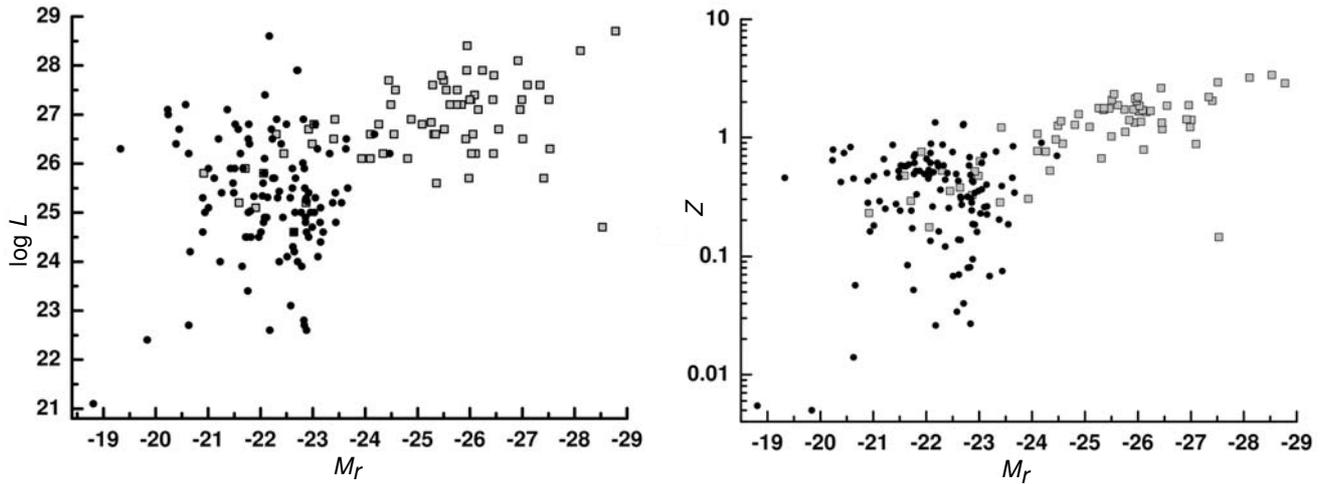


Рис. 7. Слева — связь между абсолютной звездной величиной  $M_r$  и светимостью  $\log L$  на частоте 1.4 ГГц для 118 радиогалактик (кружки) и 70 радиоквazarов (квадратики) с известными красными смещениями. Справа — для тех же источников распределение  $M_r$  в зависимости от красного смещения.

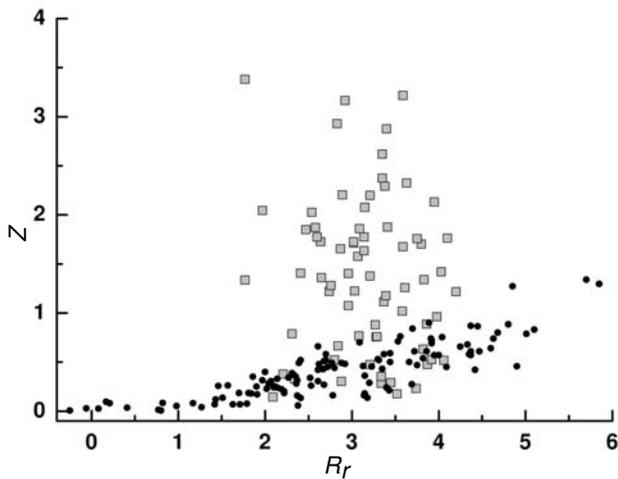


Рис. 8. Зависимость индекса активности в радиодиапазоне от красного смещения для 118 галактик (кружки) и 70 квазаров (квадратики) с известными красными смещениями (спектральными или фотометрическими).

Мы сравнили изменение радиосветимости RCR-источников на частотах 1.4 и 3.94 ГГц при уменьшении плотности потока (левая и правая части Рис. 6, соответственно). Квазары отмечены квадратиками, галактики — кружками. Ломаная линия соединяет медианные величины светимости при соответствующей медианной плотности потока в бинах примерно по  $0^{\text{m}}4$  (для граничных точек взяты большие интервалы). Верхняя линия показывает изменение светимости квазаров, нижняя — галактик. Ход линий различается на обеих частях рисунка. У квазаров светимости практически не меняются с уменьшением плотности потока, а

у галактик существенно снижаются. Если мы проследим тенденцию уменьшения светимости галактик до 1 мЯн на 1.4 ГГц (или  $t_N \sim 16^{\text{m}}4$ ), то получим оценку  $L \sim 10^{23}$  Вт/Гц. Это соответствует светимости галактик с темпом звездообразования  $SFR \lesssim 10\text{--}50 M_{\odot}$  [65], то есть на низких плотностях потока доминируют галактики с активным звездообразованием.

С помощью сервисов CasJobs<sup>19</sup> оценены абсолютные звездные величины в фильтре  $r$ . На Рис. 7 слева показана связь абсолютной звездной величины  $M_r$  и радиосветимости на частоте 1.4 ГГц, справа —  $M_r$  и красного смещения. Средняя абсолютная звездная величина галактик  $M_r \sim -22^{\text{m}}3$  соответствует массивным звездным системам. Квазары, у которых  $Z \lesssim 1$ , попадают на Рис. 7 в ту же область, что и галактики. Более далекие квазары, а их больше, имеют большую радиосветимость и абсолютную звездную величину. Средняя величина  $M_r$  для квазаров составляет  $-25^{\text{m}}3$ .

На Рис. 8 для галактик и квазаров с известными  $Z$  показано изменение индекса  $R_r$  с ростом красного смещения. У галактик наблюдается систематический рост  $R_r$  с увеличением  $Z$  из-за того, что у галактик вклад светимости звездного населения смещается в красную область спектра. У квазаров индекс  $R_r$ , который у них связан с характеристиками “центральной машины”, не меняется с красным смещением.

<sup>19</sup><http://skyservice.pha.jhu.edu/CasJobs/>.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью программных средств виртуальной обсерватории проведено отождествление радиоисточников каталога RCR по новым глубоким обзорам оптического и инфракрасного диапазонов. Анализ данных проведен для 562 объектов, включая 12 блендированных источников. Надежно отождествлены 86%, для 8% обнаружены возможные кандидаты, и 6% источников попали в пустые поля. Для 52% источников отождествление проведено повторно, что подтвердило отождествления источников каталога RC или FIRST, а 48% отождествлены в этой работе впервые.

По картам FIRST проведена морфологическая классификация источников и определено, какие из объектов каталога FIRST являются радиоисточниками, а какие лишь их компонентами. К многокомпонентным (больше двух компонент) радиоисточникам отнесены 15% объектов. Источники с числом компонент от 3 до 9 достаточно близкие ( $Z < 0.5 - 0.7$ ), а точечные и двойные источники — более далекие ( $Z > 1$ ). Около 10% объектов имеют морфологические признаки возможного возобновления активности радиоисточника, 3% источников имеют слабые протяженные компоненты без уярчений, что может свидетельствовать о прекращении “подпитки” компонентов джетом.

По фотометрическим данным для отождествленных RCR-источников получилось, что 52% являются галактиками, 24% объектов — квазары и у 24% тип не установлен из-за слабости блеска или отсутствия оптического объекта на цифровых изображениях используемых обзоров. Для 80% отождествлений фотометрически подтверждена их внегалактическая природа. Проведена более точная классификация родительских галактик по показателям цвета с использованием SDSS, 2MASS, LAS UKIDSS и WISE. 30% из них — квазары, причем для половины из них тип подтверждается спектрально. Из 290 галактик 9% мы отнесли к близким ( $Z < 0.4$ ) галактикам ранних типов и 3% — к близким галактикам поздних типов.

Для всех радиоисточников каталога RCR определен индекс активности  $R_r$  в радиодиапазоне. По зависимости радиосветимости от индекса активности в радиодиапазоне, полученной по квазарам и галактикам с известными красными смещениями, проведена оценка радиосветимости источников на 1.4 и 3.94 ГГц. Только 3% из них можно отнести к источникам типа FRI со светимостью  $L \lesssim 10^{24}$  Вт/Гц на 1.4 ГГц. Большинство RCR-источников (60%) являются мощными радиогалактиками FR II-типа.

Мы разделили источники каталога RCR по плотности потока на 3.94 ГГц на три группы — яркие источники с  $S > 60$  мЯн, промежуточная группа —  $20 \text{ мЯн} < S \leq 60 \text{ мЯн}$ , и слабые —  $S \leq 20$  мЯн. Яркие источники из первой выборки практически все отождествились. Количество отождествлений от первой группы к третьей уменьшается. Сохраняется приблизительно равное соотношение источников с плоскими и крутыми спектрами, хотя в выборке ярких источников существенно больше источников с ультракрутыми спектрами (каждый десятый), а среди слабых источников — инверсных спектров (каждый пятый). От ярких объектов к слабым снижается индекс активности в радиодиапазоне и радиосветимость. Если экстраполировать эту зависимость, то получается, что при плотности потока  $S < 10$  мЯн на 3.94 ГГц доля источников FR I-типа будет сравнима с FR II.

Для квазаров и галактик с известными красными смещениями мы оценили радиосветимости, абсолютные звездные величины и сравнили поведение этих характеристик с изменением индекса  $R_r$  и  $Z$ . Абсолютная звездная величина радиогалактик заключена в интервале от  $-20^m$  до  $-24^m$  для широкого диапазона индекса  $R_r$ . У радиоквазаров наоборот — индекс  $R_r$  меняется мало, при этом  $M_r$  меняется от  $-21^m$  до  $-28^m$ . Индекс  $R_r$ , который отражает для квазаров отношение светимости аккреционного диска в оптическом диапазоне к светимости радиоджетов, почти не меняется с  $Z$ , что характеризует постоянство механизмов излучения центральной машины до  $Z \sim 3$ .

Полученный компилятивный каталог предполагается использовать для дальнейшего изучения радиоисточников каталога RCR.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность академику РАН Юрию Николаевичу Парийскому как одному из основных инициаторов и организаторов эксперимента “Холод”. Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 10-07-00412-а, 11-02-00489-а, 11-02-12036-офи-м и 12-07-00503-а). В исследованиях использовались программные средства доступа к каталогам VizieR (CDS, Страсбург, Франция), а также база данных внегалактических объектов NED (NASA/IPAC Extragalactic Database) и научный архив инфракрасных данных IRSA (NASA/IPAC Infrared Science Archive), поддерживаемые лабораторией JPL Калифорнийского технологического университета по контракту с NASA. Авторы благодарят О. В. Верходанова за использование его программного пакета `spg`. Наблюдения на радиотелескопе РТАН-600 проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт 14.518.11.7054).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю. Н. Парийский, Д. В. Корольков, Сообщения САО **12**, 5 (1984).
2. Yu. N. Parijskij and D. V. Korol'kov, *Astrophys. Space Phys. Rev.* **5**, 40 (1982).
3. Yu. N. Parijskij et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **87**, 1 (1991).
4. Yu. N. Parijskij et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **96**, 583 (1992).
5. J. N. Douglas, F. N. Bash, G. W. Torrence, and C. Wolfe, *Univ. Texas Publ. Astron.* **17**, 1 (1980).
6. A. Fletcher et al., *Astron. Rep.* **40**, 759 (1996).
7. В. В. Витковский и др., Сообщения САО **53**, 86 (1987).
8. О. П. Желенкова, диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук (SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, 2007).
9. M. Goss et al., *Astron. Rep.* **69**, 673 (1992).
10. A. I. Kopylov et al., *Astron. Rep.* **72**, 613 (1995).
11. Yu. N. Parijskij et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **40**, 5 (1996).
12. Yu. N. Parijskij et al., *Astron. Rep.* **75**, 302 (1998).
13. O. V. Verkhodanov et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **52**, 5 (2001).
14. T. Pursimo et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **134**, 505 (1999).
15. J. J. Condon et al., *Astronom. J.* **115**, 1693 (1998).
16. R. H. Becker et al., *Astrophys. J.* **475**, 479 (1997).
17. N. S. Soboleva et al., *Astrophysical Bulletin* **65**, 42 (2010).
18. D. G. York et al., *Astronom. J.* **120**, 1579 (2000).
19. K. Abazajian et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 543 (2009).
20. H. Aihara et al., *Astrophys. J. Suppl.* **193**, id. 29 (2011).
21. O. P. Zhelenkova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 109 (2009).
22. O. P. Zhelenkova and A. I. Kopylov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 346 (2008).
23. I. N. Reid et al., *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **103**, 661 (1991).
24. S. G. Djorgovski et al., arXiv:astro-ph/9809187 (1998).
25. R. M. Cutri et al., *The 2MASS all-Sky Catalog of Point Sources* (2003).
26. M. F. Skrutskie et al., *Astronom. J.* **131**, 1163 (2006).
27. S. Dye et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **372**, 1227 (2006).
28. A. Lawrence et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **379**, 1599 (2007).
29. O. P. Zhelenkova et al., *Baltic Astronomy* **21**, 371 (2012).
30. О. П. Желенкова и др., Труды Института прикладной астрономии РАН **24**, 282 (2012).
31. E. Wright et al., *Astronom. J.* **140**, 1868 (2010).
32. W. A. Joye and E. Mandel, *ASP Conf. Ser.* **12**, 489 (2003).
33. F. Bonnarel et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **143**, 33 (2000).
34. A. E. Kimball and Ž. Ivezić, *Astronom. J.* **136**, 684 (2008).
35. P. N. Best et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **346**, 627 (2003).
36. M. B. Taylor, *ASP Conf. Ser.* **347**, 29 (2005).
37. A. R. Thakar et al., *ASP Conf. Ser.* **347**, 684 (2005).
38. O. P. Zhelenkova et al., *Russian Digital Libraries* **13**, N 4 (2010).
39. F. Ochsenbein et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **143**, 221 (2000).
40. Ž. Ivezić et al., *Astronom. J.* **120**, 967 (2000).
41. B. L. Fanaroff and J. M. Riley, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **167**, 31 (1974).
42. A. Mareski et al., *Astronom. and Astrophys.* **448**, 479 (2006).
43. L. Lara et al., *Astronom. and Astrophys.* **348**, 699 (1999).
44. C. C. Cheung, *Astronom. J.* **133**, 2097 (2007).
45. F. K. Liu, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **347**, 1537 (2004).
46. Yu. N. Parijskij et al., *Astron. Rep.* **54**, 675 (2010).
47. F. B. Abdalla et al. *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **417**, 1891 (2011).
48. D. J. Helfand, S. Scott, R. H. Becker, and R. L. White, *Astronom. J.* **117**, 1568 (1999).
49. N. Thyagarajan, D. J. Helfand, R. L. White, and R. H. Becker, *Astrophys. J.* **742**, 49 (2011).
50. Ž. Ivezić et al., *Astronom. J.* **124**, 2364 (2002).
51. K. R. Covey et al., *Astronom. J.* **134**, 2398 (2007).
52. D. P. Schneider et al., *Astronom. J.* **134**, 102 (2007).
53. X. B. Wu et al., *Astronom. J.* **144**, 49 (2012).
54. I. Strateva et al., *Astronom. J.* **122**, 1861 (2001).
55. D. Stern et al., *Astrophys. J.* **753**, 30 (2012).
56. G. Miley and C. De Breuck, *Astron and Astrophys. Rev.* **15**, 67 (2008).
57. F. N. Owen and M. J. Ledlow, *ASP Conf. Ser.* **54**, 319 (1994).
58. C. M. Urry and P. Padovani, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **107**, 803 (1995).
59. C. A. Jackson and J. V. Wall, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **304**, 160 (1999).
60. R. D. Blandford and D. G. Payne, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **199**, 883 (1982).
61. R. D. Blandford and R. Znajek, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **179**, 433 (1977).
62. A. Laor, *Astrophys. J.* **453**, L111 (2000).
63. R. B. Metcalf and M. Magliocchetti, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **365**, 101 (2006).
64. M. Chiaberge and A. Marconi, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **416**, 917 (2011).
65. S. Vattakunnel et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **420**, 2190 (2012).

## Identification and Properties of Host Galaxies of RCR Radio Sources

O. P. Zhelenkova, N. S. Soboleva, E. K. Majorova, A. V. Temirova

FIRST and NVSS radio maps are used to cross identify the radio sources of the RCR catalog, which is based on observational data obtained in several runs of the “Cold” survey, with the SDSS and DPOSS digital optical sky surveys and the 2MASS, LAS UKIDSS, and WISE infrared surveys. Digital images in various filters and the coadded *gri*-band SDSS images, red and infrared DPOSS images, *JHK*-band UKIDSS images, and *JHK*-band 2MASS images are analyzed for the sources with no optical candidates found in the above catalogs. Our choice of optical candidates was based on the data on the structure of the radio source, its photometry, and spectroscopy (where available). We found reliable identifications for 86% of the radio sources; possible counterparts for 8% of the sources, and failed to find any optical counterparts for 6% of the sources because their host objects proved to be fainter than the limiting magnitude of the corresponding surveys. A little over half of all the identifications proved to be galaxies; about one quarter were quasars, and the types of the remaining objects were difficult to determine because of their faintness. A relation between the luminosity and the index of activity at radio frequencies was derived and used to estimate the 1.4- and 3.94-GHz luminosities for the sources with unknown redshifts. We found 3% and 60% of all the RCR radio sources to be FR I-type objects ( $L \lesssim 10^{24}$  W/Hz at 1.4 GHz) and powerful FR II-type galaxies ( $L \gtrsim 10^{26.5}$  W/Hz), respectively, whereas the rest are intermediate-luminosity sources including objects of the FR I, FR II, and mixed FR I-FR II types. Unlike quasars, galaxies show a trend of decreasing luminosity with decreasing flux density. Note that identification would be quite problematic without the software and resources of the virtual observatory.

Keywords: *galaxies: active—galaxies: quasars—radio continuum: galaxies—catalogs—surveys*