

УДК 52-77(083.8)

## ИЗУЧЕНИЕ ВЫБОРКИ КАТАЛОГА RC В ОБЛАСТИ, СОВПАДАЮЩЕЙ С ОБЗОРАМИ FIRST И SDSS. II: ОПТИЧЕСКОЕ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ С ОБЗОРОМ SDSS И КАТАЛОГАМИ USNO-B1 И 2MASS

© 2009 О. П. Желенкова, А. И. Копылов

*Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия*

Поступила в редакцию 10 ноября 2008 г.; принята в печать 10 марта 2009 г.

Представляем результаты оптического отождествления выборки радиоисточников каталога RC в области, пересекающей с обзорами FIRST и SDSS. Для 320 радиоисточников, идентифицированных с объектами каталогов NVSS и FIRST, проведено оптическое отождествление с обзором SDSS. При выборе оптических кандидатов максимально использовалась информация о структуре радиоисточников по изображениям обзора FIRST. Оптические кандидаты обнаружены для примерно 70% радиоисточников.

Ключевые слова: *радиоисточники*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Мощные радиогалактики наблюдаются практически на любом космологическом расстоянии, но часто их родительские галактики оказываются достаточно слабыми объектами в оптическом диапазоне. Для отождествления радиоисточника и определения красного смещения родительской галактики требуются существенные затраты наблюдательного времени. История отождествления каталога ярких радиоисточников 3CR ( $\nu=187$  МГц,  $S_{lim}=5$  Ян) [1, 2] является тому иллюстрацией. Предела Паломарского фотографического обзора (Palomar Observatory Sky Survey или POSS), примерно  $20.5^m$  для Е-пластинок, оказалось достаточным для отождествления 65% радиоисточников каталога, оставшиеся 35% отождествлялись почти три десятилетия [3–8]. Для более низких плотностей потока количество отождествленных в оптике радиоисточников быстро падает. Например, для обзора В2 ( $\nu=408$  МГц,  $S_{lim} = 250$  мЯн) число отождествлений по POSS составляет 38% [9], а для более глубоких первого ( $\nu=610$  МГц,  $S_{lim} \sim 20$  мЯн) и второго ( $\nu=1415$  МГц,  $S_{lim} \sim 7$  мЯн) Вестерборкских обзоров получается еще меньше — порядка 20% [10].

Поле зрения больших телескопов обычно не превышает  $10'$  –  $20'$ , поэтому до появления каталогов АРМ [11], USNO [12] и GSC [13] было проблематично обеспечить необходимое количество опорных звезд для координатной привязки, поэтому дополнительно приходилось определять

в исследуемом поле вторичные астрометрические стандарты.

Если радиоисточник не является точечным, а имеет более сложную структуру, то при отождествлении используются составные изображения из снимков в оптическом и радио диапазонах. Для уверенного выбора оптического кандидата требуются хорошая точность координатной привязки (порядка  $1''$ ) и высокое угловое разрешение радиоизображений (например, как в обзоре FIRST –  $5.4''$ ), а в оптическом диапазоне — глубокие прямые снимки (предел по звездным величинам  $23^m - 24.5^m$  в фильтре R) с точностью астрометрической привязки не хуже, чем в радиодиапазоне. Если и в этом случае имеется несколько оптических кандидатов, то выбор можно сделать, привлекая дополнительную информацию, например, данные широкополосной фотометрии. Однако только спектральные исследования позволяют надежно выявить родительскую галактику радиоисточника.

В начале 80-х на РАТАН-600 был проведен глубокий обзор полосы неба шириной  $20'$ , центрированной на склонении источника SS433 ( $\delta_{1950.0} = +4^\circ 54'$ ). На частоте 3.94 ГГц ( $\lambda=7.6$  см) обзор имеет угловое разрешение  $\Delta\alpha \sim 1'$ . Координатная точность каталога RC, полученного по материалам обзора, составляет порядка  $5'' \times 45''$  по прямому восхождению и склонению соответственно [14, 15]. Самые слабые детектируемые источники имеют плотность потока порядка 4 мЯн. В полосе  $\pm 5'$  от центрального склонения обзора для

источников с плотностью потока  $S_{3.94\text{ GHz}} > 7.5 \text{ мЯн}$  полнота каталога составляет 0.8. Каталог RC включает 1165 источников [16, 17].

Первая программа оптического отождествления каталога RC была проведена по фотографическому материалу, полученному на БТА в 1984–1986 г.г. [18]. Затем исследовалась выборка (266 объектов) с уточненными по каталогу TXS [19] координатами по увеличенным фотографическим отпечаткам POSS [20, 21]. Из них у 72 (~27%) были обнаружены оптические кандидаты.

Работа по отождествлению была продолжена для выборки радиоисточников каталога RC с крутыми спектрами (Steep Spectrum или SS) по глубоким ПЗС снимкам ( $m_R^{lim} \sim 24^m$ ) полученным на БТА по программе поиска далеких радиогалактик “Большое Трио” [22–24]. Астрометрическая привязка малых областей ПЗС-кадров (примерно  $3' \times 3'$ ) выполнялась по вторичным стандартам, координаты которых определялись по POSS-I [25] и каталогам APM и GSC. Отождествление проводилось совмещением оптических снимков и радиоизображений VLA с высоким угловым разрешением.

С появлением глубокого обзора неба в оптическом диапазоне SDSS [26] и радиообзора FIRST [27] появилась возможность продолжить отождествление каталога RC, а также уточнить результаты отождествления источников из работ [20] и [21]. Для предельной звездной величины SDSS  $m_r = 22.6^m$  предположительно отождествляется порядка 50% радиоисточников обзора FIRST, поэтому мы полагали, что для каталога RC возможно отождествление, как минимум, такой же доли объектов.

## 2. ОПТИЧЕСКОЕ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ

Каталог RC перекрывается с обзорами SDSS и FIRST в интервале прямых восхождений с  $8^h 11^m$  по  $16^h 25^m$ . Сюда попадают 432 объекта. Сопоставление изображений обзора NVSS [28] с угловым разрешением  $45''$  и обзора FIRST с разрешением  $5.4''$  показывает, что для оптического отождествления надо использовать последний, особенно в тех случаях, когда объект NVSS не является точечным (угловой размер источника  $\geq 23''$ ) и распадается на изображениях FIRST на компоненты или независимые источники.

В сложных случаях (многокомпонентные источники, группа независимых радиоисточников или наличие нескольких оптических кандидатов) для оптического отождествления требуется подробная информация о структуре источника. Для детализации структуры радиоисточников по данным обзора FIRST, кроме прорисовки контуров с помощью

средств программного приложения Aladin [29], использовался программный сервис, строящий изофоты плотности потока по исследуемым областям без потери углового разрешения [30].

Имеется связь между структурой радиоисточника и положением родительской галактики, поэтому при выборе оптического кандидата, кроме координатного совпадения, нужно учитывать морфологический тип источника. Основой для морфологической классификации радиоисточников послужила несколько измененная нами схема Лоуренса и др. [31]. Мы рассматривали следующие типы:

- точечные радиоисточники (core или C). Для них наиболее вероятное положение родительской галактики совпадает с положением максимума плотности потока;
- источники с односторонним джетом (core-jet или CJ). У таких источников положение оптического кандидата совпадает с ярким компактным компонентом;
- источники с ярким ядром и компонентами (core-lobe или CL). Плотность потока у них спадает от центра к краям. Оптический кандидат совпадает с пиком излучения;
- двойные источники (double или D) и двойные источники с удвоением компонентов (double-double или DD). Оптический кандидат для двойных радиоисточников находится между компонентами или совпадает с минимумом интенсивности между сливающимися компонентами;
- двойные с ядром (double-core или DC). Двойной радиоисточник, у которого имеется слабое по сравнению с компонентами ядро. Оптический кандидат совпадает с ядром;
- triple (T). Радиоисточник из трех компонентов, центральная часть которого сравнима по плотности потока с двумя другими компонентами. Оптический кандидат совпадает с центральным компонентом;
- multiple (M). Многокомпонентный источник, структуру которого сложно отнести к перечисленным выше. В этом случае сложно определить положение оптического кандидата, надо использовать дополнительную фотометрическую или спектральную информацию об оптических объектах, попадающих в область ошибок координатной привязки.

По этой схеме мы классифицировали 320 источников. Затем по морфологическому типу источника определялось положение оптического кандидата. В ряде случаев его положение относительно изофот радиоизображения позволяло уточнить тип радиоисточника или отнести компоненты к отдельным радиоисточникам. Например, если каждый компонент предполагаемого двойного источника имел угловые размеры порядка  $2''$  и совпадал с оптическим объектом, то далее мы рассматривали его как два точечных источника, поскольку вероятность случайного совпадения из-за низкой поверхностной плотности радиоисточников очень мала.

В качестве координат предполагаемого оптического кандидата (далее называем его центром радиоисточника) принимались:

- F — координаты точечного источника или источника с четко выраженным ядром, взятые из каталога FIRST (213 источников);
- N — если источник имеет два компонента FIRST с разными плотностями потоков, при этом в NVSS — это один объект, то координаты NVSS как центр тяжести радиоисточника используются в качестве предполагаемого положения оптического объекта (32 источника);
- Fm — координаты центра двойного радиоисточников, которые измерялись по контурной карте изображения из обзора FIRST (75 источников):
  - если на изображении имеется слабое ядро, координат которого нет в каталоге FIRST;
  - при отсутствии ядра по контурам радиоизображения FIRST устанавливается его предположительное положение.

Оптический объект считался наиболее вероятным кандидатом для отождествления (“+”), если его положение (по каталогу SDSS) было не дальше  $3\sigma$  от центра радиоисточника, где  $\sigma$  — ошибка координат. К сомнительным отождествлениям (“?”) отнесены следующие случаи:

- источник точечный или двойной с ядром, а оптический объект расположен хотя близко, но дальше  $3\sigma$  от центра радиоисточника;
- два оптических объекта рядом с предполагаемым положением оптического кандидата;

- источник двойной, положение ядра определяется неуверенно, оптический объект сдвинут в сторону от линии, соединяющей максимумы плотностей потока компонентов;
- сложно сделать выводы о структуре радиоисточника по радиокarte FIRST (рассматривать его как многокомпонентный радиоисточник или считать несколькими независимыми радиоисточниками).

Средняя координатная ошибка обзора FIRST —  $0.5''$ , а для источников с плотностью потока  $S_{1.4GHz} \sim 1 \text{ мЯн}$  —  $1''$ . Для обзора NVSS точность радиокординат лучше  $1''$  для источников с  $S_{1.4GHz} > 15 \text{ мЯн}$ . Для объектов, у которых способ определения центральной части радиоисточника обозначен “Fm” или “N”, мы оценили ошибку координат в  $1''$ , а для “F” —  $0.5''$ . В исследуемой области средняя поверхностная плотность объектов SDSS на квадратную угловую секунду (при  $m_r^{lim} = 22.6^m$ ) составляет  $\sim 0.0020$ . Точность координатной привязки SDSS составляет  $0.1''$ .

Эти значения использовались для расчета нормализованного расстояния  $D$  от оптического кандидата до центра радиоисточника:

$$D = \sqrt{\frac{\Delta\alpha^2}{\sigma_\alpha^2} + \frac{\Delta\delta^2}{\sigma_\delta^2}}, \text{ где } \sigma_\alpha^2 = \sigma_{\alpha_{rad}}^2 + \sigma_{\alpha_{opt}}^2$$

$$\text{и } \sigma_\delta^2 = \sigma_{\delta_{rad}}^2 + \sigma_{\delta_{opt}}^2.$$

Отношение максимального правдоподобия  $LR^1$  используется как эффективная оценка надежности отождествления.  $LR$  для точечных источников вычисляется по формуле:

$$LR(D) = \frac{1}{2\lambda} e^{-\frac{D^2}{2}} (2\lambda - 1), \text{ где } \lambda = \pi\sigma_\alpha\sigma_\delta\rho$$

и  $\rho$  — число объектов на квадратную угловую секунду.

Если положение родительской галактики хорошо определяется структурой радиоисточника, что выполняется для описанных выше типов CJ, CL, DC и T (таких источников в нашей выборке 65%), то при вычислении  $LR$  можно воспользоваться приведенной выше формулой. Ее мы также использовали для двойных радиоисточников в тех случаях, когда достаточно уверенно по структуре компонентов определялось предполагаемое положение ядра. В нашей выборке это выполняется почти для  $2/3$  двойных источников.

<sup>1</sup> Подробно процедура вычисления вероятности, надежности и полноты оптического отождествления для точечных и двойных радиоисточников описана в работе [32]. Приведенные выше формулы также взяты из этой статьи.

Полученная для источников эмпирическая зависимость надежности и полноты отождествления [32] от  $LR$  определяет пороговую величину ( $LR_{cutoff}$ ), которая разделяет отождествление и возможное случайное совпадение с объектами фона.

Радиоисточники, для которых были обнаружены оптические кандидаты, по морфологическому типу и центру радиоисточника делятся на три группы:

- точечные (C);
- источники, у которых пик радиоизлучения совпадает с оптическим объектом (CL, CJ, DC и T);
- двойные радиоисточники (D и DD), для которых предполагаемое положение оптического объекта определялось не по координатам из каталога FIRST, а по форме изофот радиоизображения.

Пороговые значения функции отношения максимального правдоподобия  $LR_{cutoff}$  и соответствующие им разности оптических и радио координат  $d_{rad-opt}$  оказались близкими для всех трех групп (см. Табл. 1), что в какой-то степени подтверждает предложенную нами методику поиска оптических кандидатов.

Расчетные величины  $LR$  для оптических кандидатов и  $LR_{cutoff}$  использовались в качестве одного из проверочных критериев при выборе наиболее вероятного отождествления. Распределение разности радио и оптических координат для оптических кандидатов “+” и “?” представлено на Рис. 1.

В экваториальной области обзора SDSS имеются пропущенные области. В них поиск оптических кандидатов для радиоисточников проводился по каталогу USNO-B1. Так отождествлен один источник RC J1623+0446.

Для другого источника RC J1052+0458 на снимках SDSS имеется оптический кандидат, но информация о нем в базе данных SDSS отсутствует. Этот объект есть в каталогах USNO-B1 ( $R_2 = 19.45^m$ ) и 2MASS [33] ( $K = 14.99^m$ ).

Приведем несколько примеров отождествления радиоисточников, а также доводы, использовавшиеся при выборе оптических кандидатов.

Для источника RC J1257+0458 имелись два оптических кандидата: галактика (тип SDSS “GALAXY”) и звездообразный объект (“STAR”). Второй объект по блеску в фильтрах  $u$ ,  $g$ ,  $r$ ,  $i$ ,  $z$  больше похож на звезду, чем на квазар (квазары также попадают в классификацию “STAR”). В качестве оптического кандидата была выбрана галактика.

В первой статье [34] по отождествлению каталога RC с радиокаталогами VLSS, TXS, NVSS, FIRST и GB6 приведено отождествление двойного радиоисточника RC J0815+0453. По радиоизофотам видно, что у RC J0815+0453 имеется выраженное ядро, которое точно совпадает с галактикой, поэтому она является оптическим отождествлением, а не более слабый объект, расположенный точно на оси, соединяющей компоненты радиоисточника. Рядом с RC J0815+0453 находится еще один слабый радиоисточник FIRST J081521.3+045339 ( $S_{1.4GHz}^{peak} = 2.67$  мЯн). Оба радиоисточника отождествляются с эллиптическими галактиками, которые имеют практически одинаковые фотометрические красные смещения. Так по данным SDSS родительская галактика более слабого радиоисточника имеет  $Z_{phot1} = 0.0933 \pm 0.0049$  (аппроксимация шаблонными спектрами [35]) и  $Z_{phot2} = 0.0697 \pm 0.0142$  (метод нейронных сетей [36]). Для второй галактики фотометрическое красное смещение равно  $Z_{phot1} = 0.1235 \pm 0.0052$  и  $Z_{phot2} = 0.0694 \pm 0.0149$ , соответственно. Можно предположить, хотя для этого нужны дополнительные исследования, что эти источники образуют близкую, может быть, взаимодействующую, пару радиогалактик.

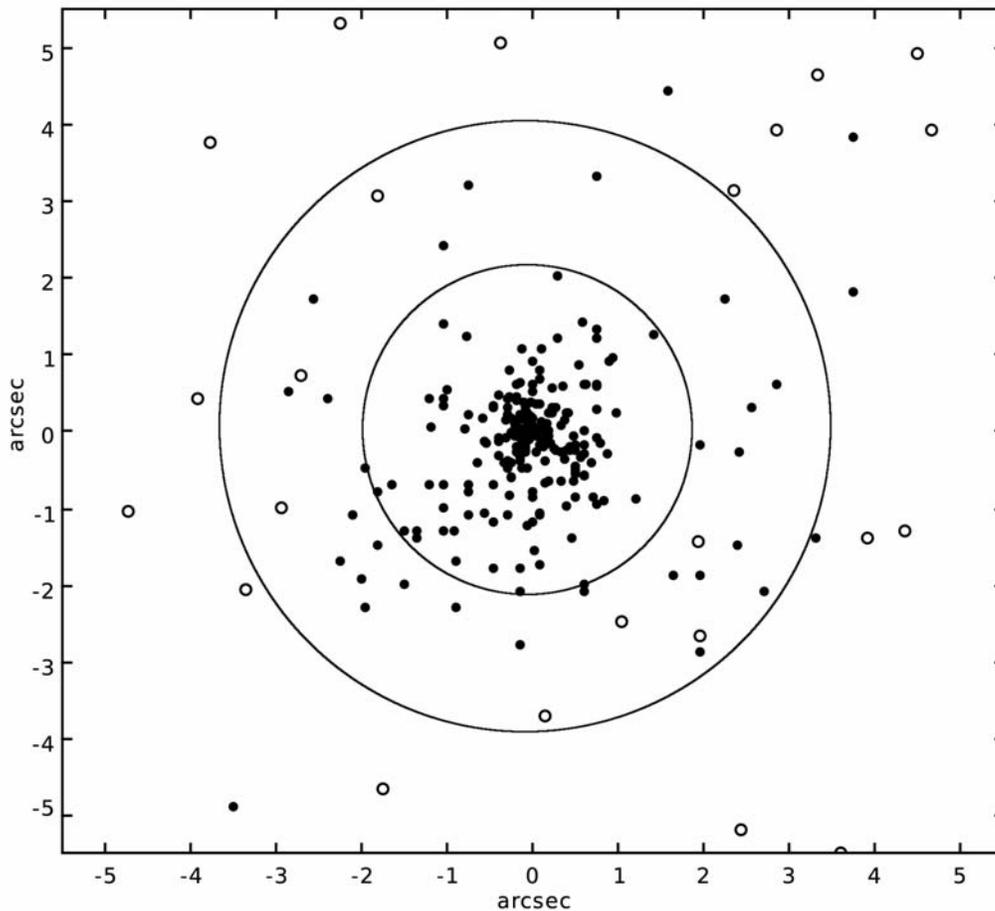
Для отождествления источника RC J0916+0441 потребовалась детальная информация о его структуре. Так, по изофотам изображения обзора FIRST, построенным с помощью Aladin, можно было предположить, что RC J0916+0441 — это бленда двух независимых радиоисточников: северного, включающего 2 объекта каталога FIRST, и южного — из 4 объектов FIRST. Однако изофоты, построенные с сохранением углового разрешения (для этого мы использовали программный сервис [30]), позволили разобраться со структурой источника. Это оказался один источник морфологического типа CJ, и его ядро совпало с галактикой (см. Рис. 2).

Следующий пример приведен на Рис. 3. На нем RC J0952+0453 расположен между компонентами двойного источника NVSS, ближе к более яркому. Для этой же области на контурной карте FIRST по форме изофот компонент источника видно, что они не связаны между собой, их ориентация не является соосной, причем, каждый компонент отождествляется с оптическим объектом. Таким образом, RC J0952+0453 является блендой двух независимых радиоисточников.

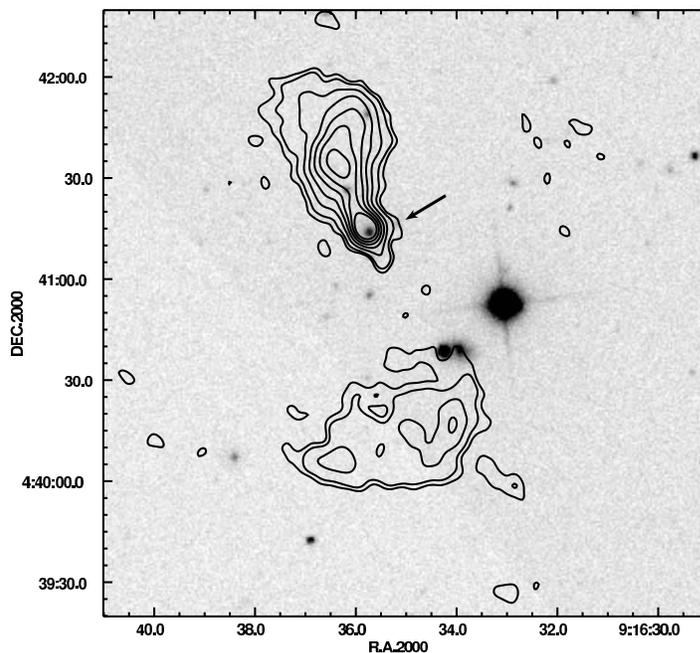
В аналогичных случаях, когда диаграммой направленности РАТАН-600 нельзя разрешить близкие радиоисточники, мы считали, что больший вклад в источник каталога RC идет от более яркого из них, и затем рассматривали его оптическое отождествление.

**Таблица 1.** Величины, характеризующие надежность оптического отождествления для источников разных типов: среднее, среднеквадратичное отклонение и медиана расстояния между оптическим кандидатом и радиоисточником, пороговая величина отношения максимального правдоподобия и соответствующий ей радиус поиска. Не приводятся данные для 4 радиоисточников (два — многокомпонентные, для двух нет карт в обзоре FIRST)

Тип	$N_{obj}$	$\phi = N_+/N_{obj}$	$\Delta d_{rad-opt}^{mean}$ arcsec	$\sigma_{\Delta d_{rad-opt}}$ arcsec	$\Delta d_{rad-opt}^{med}$ arcsec	$LR_{cutoff}$	$\Delta d_{rad-opt}^{cutoff}$ arcsec
C	124 (39%)	0.64	0.94	1.30	0.47	1.79	1.88
D,DD	108 (34%)	0.72	1.43	0.87	1.26	1.93	3.49
DC,CJ,CL,T	84 (26%)	0.76	1.44	2.16	0.75	1.41	3.58



**Рис. 1.** Распределение разности радио и оптических координат для объектов каталога RC. Черными точками обозначены уверенные оптические отождествления (“+”), кружочками — возможные (“?”). Абсцисса — разность координат источников по прямому восхождению, по ординате — склонению. Внутренняя окружность ограничивает разность координат, соответствующую  $LR_{cutoff}$  для точечных источников, внешняя — для источников с ядром.



**Рис. 2.** Составное изображение (оптика – SDSS и радио – FIRST) для радиоисточника RC J0916+0441. Изофоты, прорисованные с сохранением углового разрешения, показывают, что северный и южный источники являются компонентами одного радиоисточника “core-lobe” типа. Положение родительской галактики отмечено стрелкой.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ

В первой работе [34] мы отождествили с радиоисточниками NVSS 320 из 432 источников каталога RC, попадающих в область пересечения обзоров SDSS и FIRST. По уточненным координатам при визуальном просмотре изображений обзора SDSS, совмещенных с контурными картами FIRST, оптические кандидаты уверенно (“+”) обнаружены у 227 (71%) радиоисточников, возможные отождествления (“?”) – 25 (8%), не обнаружены оптические кандидаты у 68 (21%).

В рассматриваемую область попадают 36 объектов из выборки источников с крутыми спектрами (SS) каталога RC. 35 источников отождествлены ранее по ПЗС-снямкам, полученным на БТА по программе “Большое Трио”. Оказалось, что для 10 из них мы не обнаружили оптических кандидатов в SDSS.

Из 320 объектов, с учетом SS выборки и MG J1131+0456<sup>2</sup>, оптические кандидаты (“+” и “?”) обнаружены для 264 радиоисточника или 82%. Отметим, что далее 11 объектов, отождествленных по более глубоким снимкам, в общих подсчетах не учитываются.

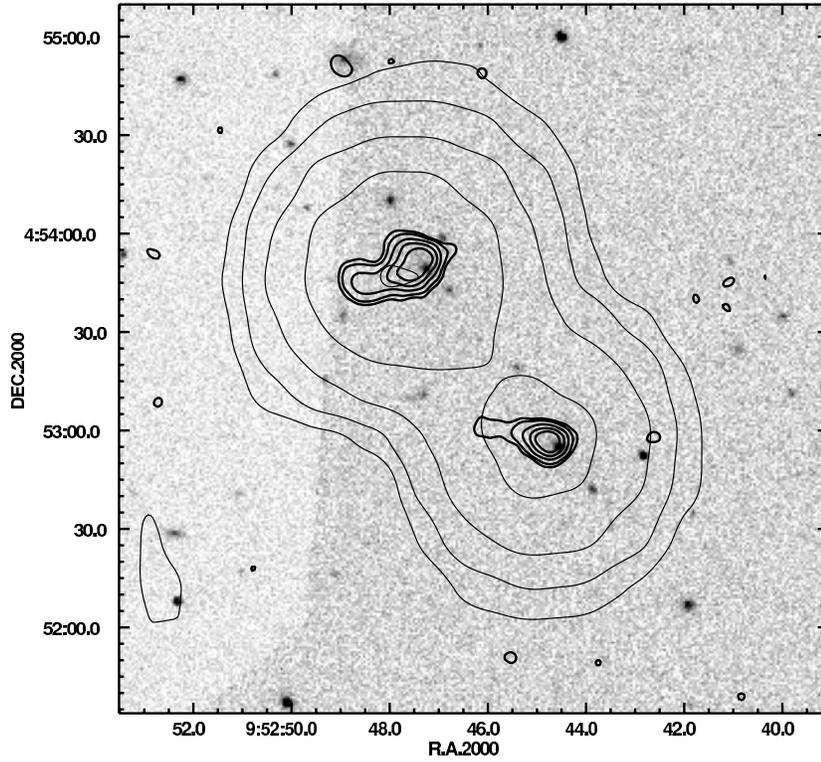
<sup>2</sup>Источник RC J1131+0455 оказался гравлинзой MG J1131+0456, отождествленной ранее в работах [37–39] по более глубоким, чем SDSS, снимкам.

Из всех отождествленных по SDSS радиоисточников 89 являются звездными объектами (“STAR”), 158 — галактиками (“GALAXY”) и еще 6 слабых объектов, имеющих в базе данных SDSS классификацию “UNKNOWN”. Звездообразные объекты в основном ярче (см. Рис. 4) и более голубые по цвету по сравнению с галактиками.

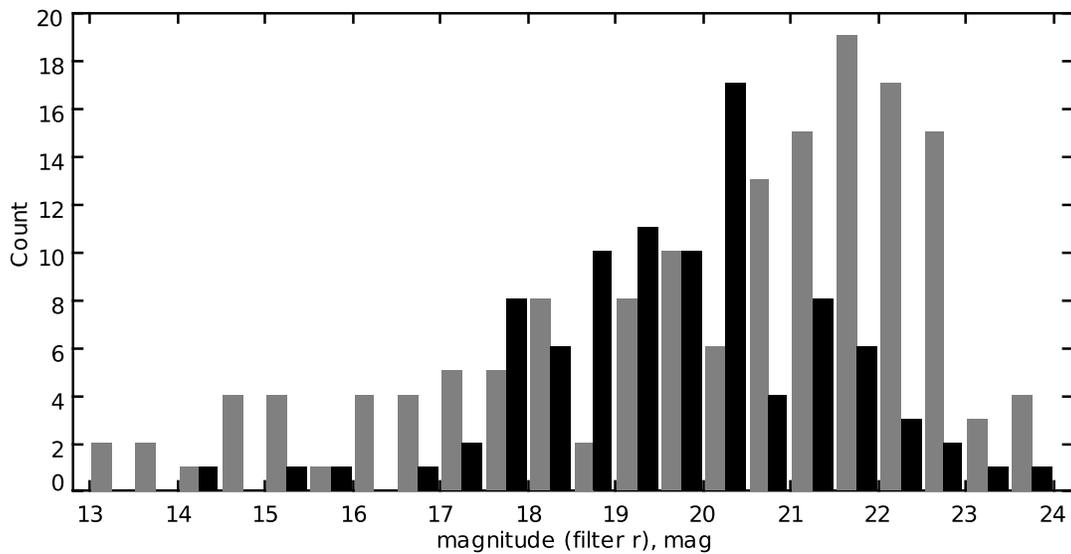
В Табл. 2 приводятся результаты отождествления радиоисточников по типам оптических кандидатов в зависимости от спектрального индекса  $\alpha_{1.4-4.85\text{ GHz}}$ . Оказалось, что хуже всего отождествляются источники с ультракрутыми спектрами и слабые источники, для которых нет данных по спектральному индексу (~35%). Для радиоисточников с инверсными, плоскими и крутыми спектрами доля не отождествленных объектов составляет 16–17%. У радиоисточников, отождествленных с галактиками, больше крутых и ультракрутых спектров, чем у отождествленных со звездообразными объектами.

В Табл. 3 мы приводим результаты отождествления 318 объектов<sup>3</sup> в зависимости от морфологического типа радиоисточника. Следует отметить, что двойные радиоисточники (D, DC, DD) отождествились в основном с галактиками. Хуже всего

<sup>3</sup>Из 320 радиоисточников два слабых диффузных объекта имеются только в обзоре NVSS. Для них нет карт с угловым разрешением обзора FIRST и, следовательно, нет возможности провести отождествление.



**Рис. 3.** Источник RC J0952+0453 оказывается между двумя компонентами источника из обзора NVSS (отмечены более тонкими контурами). Более высокое угловое разрешение обзора FIRST позволяет разделить его на два отдельных радиосточника, так как контуры изофот не связаны между собой, ориентация больших осей не совпадает и каждый компонент радиосточника отождествляется с оптическим объектом.



**Рис. 4.** Распределение по звездным величинам в фильтре г оптических объектов, отождествленных с радиосточниками каталога RC. Галактики отмечены серым цветом, звездные объекты — черным.

отождествляются точечные (С) источники. У СJ, CL и Т типов доля отождествлений выше и оптические объекты ярче, чем у точечных и двойных радиоисточников, и, скорее всего, среди них больше близких объектов. Вероятно, в неотожествленных двойных (D) и точечных (С) радиоисточниках далекие источники составляют значительную часть.

### 3.1. Сравнения двух полных по плотности потока выборок

В первой статье [34] мы сравнивали свойства радиоисточников двух полных по плотности потока выборок каталога RC из центральной части обзора “Cold”. Одна включает 130 источников, попадающих в полосу с отклонением по высоте от центра диаграммы  $\Delta H \leq |5'|$ , и плотностью потока  $S_{3.9GHz} \geq 11$  мЯн. Во вторую выборку вошли 117 источников с  $\Delta H \leq |10'|$  и  $S_{3.9GHz} \geq 30$  мЯн. Выборки частично перекрываются по объектам. Для краткости первую выборку дальше будем обозначать “1S”, вторую — “2S”.

В Табл. 4 приведены сравнительные результаты их оптического отождествления. В обеих выборках совпадает доля неотожествленных радиоисточников.

Мы разделили каждую выборку на две группы в зависимости от спектрального индекса радиоисточников в диапазоне 1.4–4.85 ГГц. В одну группу включили источники с плоскими спектрами ( $\alpha < 0.5$ ), в другую — с крутыми ( $\alpha \geq 0.5$ ), затем сравнили результаты отождествления (см. Табл. 5 и 6). В обеих выборках источники с плоскими спектрами более компактны по угловым размерам как в оптическом, так и радиодиапазоне. Как в первой, так и во второй выборке источники с крутыми спектрами чаще отождествляются с галактиками. Для источников с плоскими спектрами число отождествлений со звездообразными объектами больше, причем в более яркой выборке 2S их почти в два раза больше, чем галактик. Звездообразные объекты с плоскими спектрами образуют отдельную группу, поскольку отличаются от остальных объектов в обеих выборках показателями цвета.

В наших двух выборках преобладают излучающие в радиодиапазоне AGN, что следует из последних подсчетов радиоисточников. Так, для плотностей потока  $S_{1.4GHz} \geq 100$  мЯн доминируют радиоизлучающие AGN со светимостью в радиодиапазоне выше  $\sim 2 \times 10^{25} W Hz^{-1}$  [40], т.е. источники FR II типа [41], а для более слабых источников ( $1 < S_{1.4GHz} \leq 100$  мЯн) — радиоисточники FR I типа со светимостью ниже указанного предела [42].

Среди отождествленных радиоисточников сохраняется отношение галактик и звездообразных объектов (примерно 2 : 1), несмотря на то, что выборка 1S более глубокая по плотности потока, чем 2S. Полагаем, что звездообразные объекты в подавляющем большинстве являются квазарами, на что указывают фотометрические и спектральные данные SDSS.

### 3.2. Красные смещения радиоисточников

Для 58 радиоисточников из отождествляемого нами списка в SDSS имеются спектральные данные. Это 28 квазаров и 30 галактик. Радиоисточники, отождествленные с галактиками, оказались достаточно близкими объектами с  $Z_{galaxy}^{median} = 0.20$  и блеском  $m_r^{median} = 18.7^m$ , а отождествленные с квазарами — далекими источниками ( $Z_{qsr}^{median} = 1.76$ ). Они ярче галактик почти на звездную величину ( $m_r^{median} = 17.1^m$ ). Именно эти объекты входят в группу компактных радиоисточников с плоскими спектрами, которую мы отметили выше. Самые далекие из отождествленных радиоисточников, квазары с красным смещением  $Z > 1.7$ , имеют в радиодиапазоне плоские и инверсные спектры. Это точечные радиоисточники (С), с угловыми размерами  $LAS \sim 2''$ , неразрешаемые в обзоре FIRST.

Собрав вместе информацию о красных смещениях и видимых звездных величинах для исследуемых радиоисточников каталога RC, включая и SS-выборку, мы построили зависимость “красное смещение — звездная величина”  $m_R$  (см. Рис. 5). В график включены данные по 151 радиоисточнику каталога RC: 101 галактика и 42 квазара. Это — 58 вышеупомянутых объектов, 72 источника SS-выборки каталога RC с красными смещениями, определенными на БТА [23] и [43–46] и еще 21 галактика из числа отождествленных нами объектов. Для последних использованы фотометрические красные смещения из базы данных SDSS [35], поскольку в диапазоне  $Z_{phot} < 0.5 - 0.6$  у галактик с  $m_r < 20^m$  и ошибками определения  $err_{Z_{phot}} < 0.02 - 0.03$  красные смещения хорошо согласуются с эмпирическим распределением Z–R для объектов с известными спектральными Z.

Зависимость “красное смещение — звездная величина”<sup>4</sup> для радиогалактик четко прослеживается до  $Z \sim 1$  и сохраняется на больших красных смещениях, у квазаров такой зависимости не наблюдается. Диаграмма Z–R для радиогалактик на  $Z \geq 1.5$  образует две ветви, возможно, из-за

<sup>4</sup>Для преобразования звездных величин  $m_r$  в  $m_{Rc}$  использовалась формула из работы Джорди и др. [47].

**Таблица 2.** Результаты отождествления в зависимости от спектрального индекса  $\alpha_{1.4-4.85\text{ GHz}}$  радиисточников (при  $S \sim \nu^{-\alpha}$ ) для галактик (GALAXY), звездных объектов (STAR), объектов неопределенного типа (UNKNOWN) и неотожествленных источников (Empty Field или EF)

Тип отождествлений	I ( $\alpha < -0.1$ ) (29)	F ( $-0.1 \geq \alpha < 0.5$ ) (77)	S ( $0.5 \geq \alpha < 1$ ) (142)	U ( $\alpha \geq 1$ ) (31)	Нет данных (41)
GALAXY (157)	10	26	86	14	21
STAR (88)	14	36	28	5	6
EF (68)	5	12	25	11	14
UNKNOWN (6)	—	2	3	1	—

**Таблица 3.** Результаты оптического отождествления объектов каталога RC для разных морфологических типов радиисточников. В подсчеты не включены 4 источника: два — многокомпонентные, которые мы не смогли отнести к перечисленным ниже типам, и еще два слабых источника отсутствуют в обзоре FIRST. Для LAS и  $m_r$  приведены медианные величины

Тип	$N_{obj}$	LAS, arcsec	+	?	EF	STELLAR	$m_r^{stellar}$ , mag	GALAXY	$m_r^{galaxy}$ , mag	UNKNOWN
C	123	1.4	78	10	35	39	20.23	45	21.04	4
CL	17	11.0	6	—	1	6	19.64	9	16.00	—
CJ	28	6.4	22	3	3	14	20.33	11	20.61	—
T	19	34.9	17	—	2	6	18.75	10	17.78	1
D, DC, DD	129	17.5	93	11	25	22	19.75	81	21.30	1

двух разных по мощности излучения групп радиогалактик.

#### 4. СРАВНЕНИЕ ДВУХЧАСТОТНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ РАДИОГАЛАКТИК

В последние два десятилетия были проведены достаточно глубокие радиообзоры всего неба на разных частотах. Несомненно, зарегистрированные в этих обзорах радиоизлучающие объекты на больших красных смещениях остаются нераспознанными из-за отсутствия эффективных методов селекции кандидатов в далекие объекты. Использование многочастотной информации в радиодиапазоне может помочь уточнить селекционные критерии отбора радиисточников с целью обнаружения далеких объектов. В нашем исследуемом списке для 143 достаточно ярких источников<sup>5</sup> имеются

<sup>5</sup>Приводим для этих источников медианные величины плотности потока на разных частотах:  $S_{74\text{ MHz}}=1070$  мЯн,  $S_{365\text{ MHz}}=450$  мЯн,  $S_{1.4\text{ GHz}}=75$  мЯн,  $S_{4.85\text{ GHz}}=41$  мЯн.

данные в диапазоне 74 — 4850 МГц из каталогов VLSS, TXS, NVSS, GB6. Для части из них плотность потока оценена по изображениям обзоров VLSS и GB6 с учетом меняющейся по координатам предельной чувствительности карт.

Мы сравнили двухчастотные спектральные индексы этих источников и известных по литературе радиогалактик с  $Z>3$ . Красные смещения для 33 радиогалактик с  $Z>3$  и плотности потоков на частотах 74 и 365 МГц, 1.4 и 4.85 ГГц взяты из работы [45], списка мощных радиогалактик из статьи [48] и из баз данных NED и Vizier.

Мы сопоставили спектральные индексы  $\alpha_{74-365\text{ MHz}}$  и  $\alpha_{365-1400\text{ MHz}}$ ,  $\alpha_{365-1400\text{ MHz}}$  и  $\alpha_{1.4-4.85\text{ GHz}}$ , а также  $\alpha_{74-365\text{ MHz}}$  и  $\alpha_{1.4-4.85\text{ GHz}}$  для исследуемых радиисточников каталога RC и радиогалактик с красным смещением  $Z>3$ . На Рис. 6 мы приводим пример сопоставления спектральных индексов. Двухчастотные спектральные индексы радиогалактик с большим красным смещением отличаются от таковых для большинства наших источников. Так, радиогалактики с  $Z>3$

**Таблица 4.** Результаты оптического отождествления двух полных по плотности потока выборок из центральной части обзора “Cold” 1S и 2S

Выборка	+	?	EF	GALAXY	STAR	UNKNOWN
1S (106)	90 (70%)	16 (12%)	24 (18%)	68 (64%)	36 (34%)	2 (2%)
2S (96)	84 (72%)	12 (10%)	21 (18%)	59 (61%)	35 (36%)	2 (2%)

**Таблица 5.** Результаты оптического отождествления двух выборок 1S и 2S для источников с плоскими и крутыми спектрами (по величине спектрального индекса  $\alpha_{1.4-4.85 GHz}$ )

Выборка/ $N_{obj}$	Доля, %	$S_{1.4 GHz}^{med}$ , мЯн	$S_{4.85 GHz}^{med}$ , мЯн	EF, %	STELLAR, %	GALAXY, %	UNKNOWN, %
1S ( $\alpha < 0.5$ ) 48	37	32.7	18	19	33	46	2
1S ( $\alpha \geq 0.5$ ) 82	63	82.3	30	18	25	56	1
2S ( $\alpha < 0.5$ ) 33	28	52.5	46	12	52	33	3
2S ( $\alpha \geq 0.5$ ) 84	72	146.5	55	20	21	69	1

попадают в область со следующими ограничениями по спектральным индексам:

- $\alpha_{74-365 MHz} > 0.5$ ;
- $\alpha_{365-1400 MHz} > 0.9$ ;
- $\alpha_{1.4-4.85 GHz} > 0.7$ .

Мы выбрали из исследуемого списка 18 радиоисточников, у которых величина спектрального индекса попадает в те же области, что и у галактик с большим красным смещением. Из них 13 входят в SS-выборку каталога RC. Для 9 объектов из 18 определено красное смещение по спектральным данным, полученным на БТА [46]. Их медианные значения звездной величины, углового размера и красного смещения составляют  $m_R = 22.6^m$ ,  $LAS = 20.1''$  и  $Z=0.82$  соответственно. Для остальных 9 объектов красные смещения не известны, они слабее ( $m_R^{median} = 23.4^m$ ) и меньше по угловым размерам ( $LAS^{median} = 7.6''$ ). Это следующие радиоисточники: RC J0820+0454, RC J0945+0454, RC J1347+0441, RC J1439+0455 (входят в SS-выборку каталога RC) и еще RC J1251+0446, RC J1357+0507, RC 1434+0445,

RC J1456+0456, RC J1607+0438. По эмпирической зависимости  $Z-R$  для каталога RC (Рис. 5) можно оценить красное смещение этих объектов как  $Z \geq 1.5$ . Их малый угловой размер согласуется с этой оценкой, однако, только спектральные наблюдения могут окончательно подтвердить наши предположения.

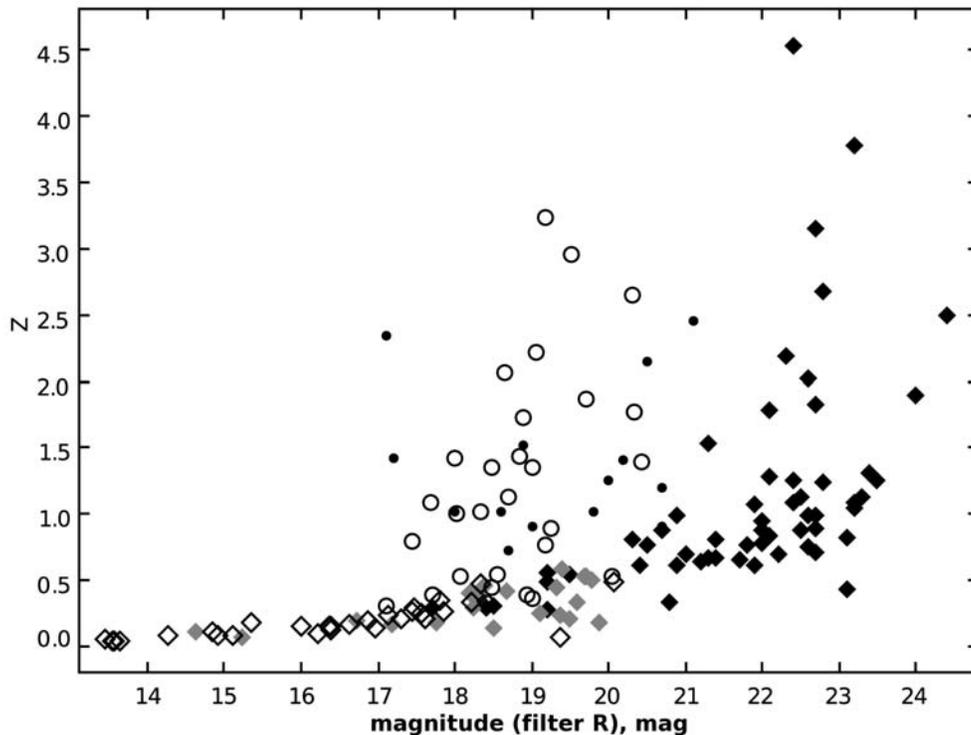
## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Появившиеся в последнее десятилетие программные средства для анализа и визуализации получаемых данных, а также свободный доступ к современным обзорам предоставляют исследователю новые, ранее не доступные, возможности в изучении небесных объектов. В то же время они предъявляют новые требования как к постановке задач, так и к методам исследования, которые в технологических решениях все больше опираются на информационные технологии и, в первую очередь, на системы управления базами данных и веб-сервисы.

Массовое отождествление источников из разных обзоров и каталогов представляет для астрономов несомненный интерес. Автоматизация процесса отождествления посредством уже работающих веб-сервисов виртуальной обсерватории, ко-

**Таблица 6.** Результаты оптического отождествления двух выборок 1S и 2S в зависимости от классификации объектов (G – “GALAXY”; S – “STAR”) и величины спектрального индекса. В колонках приведены медианные величины

Выборка	Тип, %	$S_{4.85 GHz}$ , мЯн	LAS, arcsec	$\alpha$	Size <sub>opt</sub> , arcsec	$m_u$ , mag	$m_g$ , mag	$m_r$ , mag	$m_i$ , mag	$m_z$ , mag
1S	G (46)	18	2.98	0.19	1.91	22.42	21.12	20.04	19.48	19.14
( $\alpha < 0.5$ )	S (33)	18	2.24	0.24	1.29	21.03	20.69	20.28	19.82	19.83
1S	G (56)	33	16.6	0.80	2.42	22.66	22.45	21.17	20.23	19.31
( $\alpha \geq 0.5$ )	S (24)	30	9.7	0.67	1.27	20.56	20.03	19.51	19.41	19.39
2S	G (33)	51	1.72	0.25	1.72	22.85	19.72	18.49	18.10	17.93
( $\alpha < 0.5$ )	S (52)	62	2.24	0.13	1.21	21.14	20.38	19.98	19.75	19.39
2S	G (57)	55	15.0	0.84	2.06	22.73	22.77	21.51	20.34	20.04
( $\alpha \geq 0.5$ )	S (21)	79	6.41	0.78	1.31	22.16	20.24	20.13	19.36	19.20



**Рис. 5.** Зависимость звездная величина  $m_R$  – красное смещение для радиисточников каталога RC. Галактики отмечены ромбиками, а квазары — кружками (черные ромбики и кружки отмечают Z, определенные на БТА; остальные — из базы данных SDSS).

торый кажется достаточно простым, все еще далека от совершенства. Особенно, это касается радиодиапазона из-за большого разброса в угловом разрешении, предельной чувствительности, координатной точности каталогов, а также из-за природы самих радиоисточников.

Точность определения координат в обзорах NVSS и FIRST позволяет проводить их автоматическую кросс-идентификацию с оптическими обзорами. В ряде работ приводятся результаты отождествления с оптическими обзорами APM [49] и SDSS [50]. Доля отождествлений при этом получается невысокой. В первом случае она составила 24%, во втором — 27%. Если координатная точность каталога более низкая, чем у NVSS и SDSS, например, как у GB6, то процент отождествлений получается еще ниже — порядка 0.2% [51]. В базе данных SDSS число источников FIRST, отождествленных с SDSS, составляет 30–40% от общего числа объектов каталога. Это однокомпонентные источники, для которых разность оптических и радиокоординат не превышает 2".

Сервисы, выполняющие кросс-идентификацию, работают по простому алгоритму поиска ближайшего к центру заданной области объекта. Такой алгоритм хорошо отождествляет однокомпонентные радиоисточники, но плохо источники более сложной структуры. Эффективность оптического отождествления радиоисточников с помощью существующих алгоритмов кросс-идентификации не превышает 30%.

Мы решили провести исследование выборки из каталога RC с тем, чтобы понять, насколько возможна автоматическая идентификация радиоисточников, если углового разрешения и координатной точности каталога недостаточно для оптического отождествления, какую долю источников можно отождествить, а также выявить трудности и ограничения такой процедуры.

Из-за недостаточной координатной точности каталога RC процедура отождествления выборки в области, совпадающей с обзорами SDSS и FIRST, выполнялась в два этапа. Сначала координаты радиоисточников каталога RC были уточнены отождествлением с источниками радиокаталогов с хорошей координатной точностью (в основном NVSS, который был выбран в качестве опорного). При этом в сомнительных случаях использовались не только данные из каталогов, но и изображения из радиообзоров. Оптическое отождествление проводилось по уточненным радиокоординатам с использованием контурных радиокарт, построенных по изображениям обзора FIRST. При этом учитывался морфологический тип радиоисточников. Классификация по типам

была уточнена и включала 7 типов, поскольку классификация, включающая FRI, FRII и точечные источники, показалась нам не отражающей в полной мере разнообразие структур источников обзора FIRST.

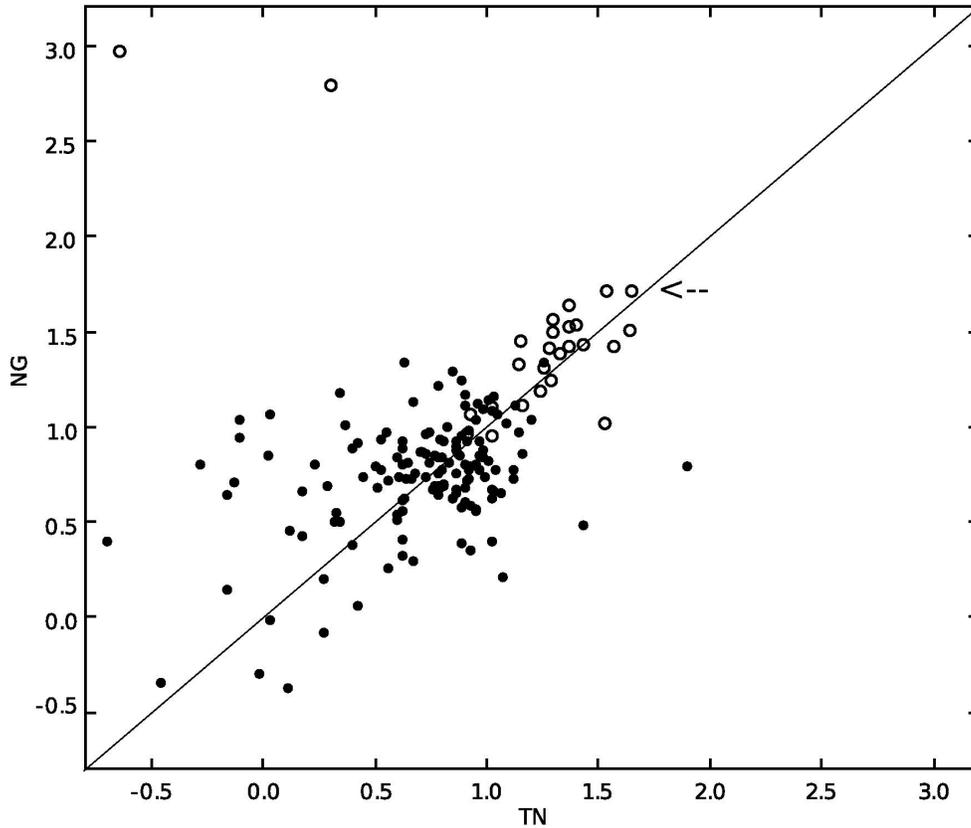
320 радиоисточников каталога RC отождествлены с источниками других каталогов и с оптическими объектами. Для них измерены угловые размеры, а также подсчитано число компонентов каталога FIRST. Соотношение однокомпонентных, двухкомпонентных, трехкомпонентных, четыре и больше компонентных радиоисточников получилось примерно следующим: 10:5:2:1.

Из этих подсчетов вытекает, что простые алгоритмы кросс-идентификации (поиск ближайшего соседа), если позволяет предельная глубина оптического обзора, лучше всего отождествляют однокомпонентные источники (56% списка). Для отождествления двойных радиоисточников, которые составляют около трети списка, необходима модификация алгоритмов. Пятуую часть списка можно отождествить, просматривая составные изображения оптического и радио диапазонов, или применять при кросс-идентификации алгоритмы с элементами распознавания образов. При отождествлении нашей выборки с SDSS мы обнаружили оптические кандидаты для примерно 75% однокомпонентных источников или порядка 33% от всего списка.

При кросс-идентификации важен задаваемый радиус поиска, который является некой индивидуальной характеристикой двух сравниваемых каталогов. Так, для FIRST и SDSS оптимальный радиус поиска для однокомпонентных источников составил 2". Если расстояние между радиоисточником и оптическим объектом больше, то отождествление маловероятно.

Сравнивая пороговые величины для функций отношения максимального правдоподобия трех групп источников нашей выборки — точечных, двойных и неточечных источников, у которых положение оптического объекта и пик радиоизлучения совпадают — мы получили свою оценку радиуса области поиска оптического объекта для обзора FIRST. Для точечных источников радиус составляет порядка 1.9", что совпадает с приведенным выше радиусом поиска для FIRST и SDSS. Для неточечных и двойных источников он составляет примерно 3.6", если за центр области поиска принимать координаты центра радиоисточника, как мы его определяли в первой статье [34].

Для почти 80% радиоисточников исследуемого списка мы обнаружили кандидаты для оптического отождествления, а для оставшихся 20% — нет, т.е. оптические объекты оказались слабее предельной глубины обзора SDSS ( $r = 22.6^m$ ). Для



**Рис. 6.** Сопоставление двухчастотных спектральных индексов  $\alpha_{365-1400\text{ MHz}}$  (TN) и  $\alpha_{1.4-4.85\text{ GHz}}$  (NG) для 143 ярких источников из исследуемого списка (черные кружочки) и известных далеких радиогалактик с  $Z > 3$  (пустые кружочки). На рисунке проведена линия равных индексов. Стрелочкой отмечена самая далекая из известных радиогалактика ( $Z=5.2$ ).

отождествленных источников соотношение галактик и звездообразных объектов составляет примерно 2 : 1, причем последние — это, скорее всего, квазары, если судить по фотометрическим и спектральным данным SDSS.

Результаты отождествлений в зависимости от морфологического типа радиисточника таковы: больше всего оптических кандидатов обнаружено для CJ, CL и T типов, для двойных радиисточников — меньше и еще меньше для точечных объектов. Двойные источники отождествляются в основном с галактиками. Источники CL и T типов отождествляются с более яркими объектами в оптике, чем CJ, двойные и точечные радиисточники. Большая доля радиисточников, отождествленных с галактиками, имеют крутые и ультракрутые спектры в диапазоне 1.4 – 4.85 ГГц по сравнению со звездообразными объектами, но среди радиисточников, попавших в “пустые поля”, доля объектов с крутыми и ультракрутыми спектрами еще выше. Для почти половины источников с ультракрутыми

спектрами оптических кандидатов не обнаружено. Среди неоттождествленных точечных источников и объектов с ультракрутыми спектрами в диапазоне 1.4 – 4.85 ГГц могут быть объекты с большим  $Z$ .

Структура радиисточника может содержать информацию о повторяющихся фазах активности радиисточника в родительской галактике. К таким системам относят “winged” или “X-shaped” радиисточники [52, 53] “double-double” радиогалактики [54], а также тройные источники (T), с двумя компонентами, охватывающими относительно яркое неразрешающееся ядро [55]. По картам обзора FIRST порядка 12 – 17% радиисточников исследуемой выборки можно отнести к “X-shaped”, “double-double” и тройным, то есть к источникам, с возможно повторяющейся фазой активности.

Мы проанализировали физические параметры отождествленных радиисточников, сравнив две полные по плотности потока выборки из центральной части обзора [34], одна с  $S_{3.9\text{ MHz}}^{\text{lim}} \geq 10\text{ мЯн}$ ,

вторая —  $S_{3.9MHz}^{lim} \geq 30$  мЯн. Оказалось, что в обеих выборках доля неотжествленных радиоисточников одинакова, и среди отождествленных совпадает отношение галактик и звездообразных объектов (примерно 2:1). Однако доля источников с плоскими и крутыми спектрами разная. В более глубокой выборке больше плоских и инверсных спектров, а крутых и ультракрутых меньше.

В обеих выборках источники с плоскими спектрами более компактны по угловым размерам как в оптическом, так и в радиодиапазоне. Источники с крутыми спектрами чаще отождествляются с галактиками, а с плоскими спектрами — чаще со звездообразными объектами. Отметим, что в выборке 2S число отождествлений со звездообразными объектами для источников с плоскими спектрами почти в два раза больше, чем с галактиками. В обеих выборках звездные объекты с плоскими спектрами отличаются по цвету от галактик с плоскими спектрами, чего не замечено для источников с крутыми спектрами.

Оптическое отождествление по SDSS выделило группу близких радиогалактик с  $Z_{sp}^{median}=0.20$  и  $m_r^{median} = 18.7^m$  и группу достаточно далеких радиоизлучающих квазаров — с  $Z_{sp}^{median}=1.76$ ,  $m_r^{median} = 17.1^m$ , причем квазары с  $Z>1.7$  — это точечные радиоисточники с угловыми размерами  $LAS^{median} \sim 2''$ . Квазары в радиодиапазоне имеют плоские и инверсные спектры, и, вероятно, составляют ту группу радиоисточников с плоскими спектрами и отличающимся спектральным распределением, о которой говорилось выше.

Крутизна спектра радиоисточника от низких частот к высоким широко используется в качестве критерия отбора кандидатов в далекие объекты. Мы сравнили спектральные индексы тех источников нашего списка, для которых имелась информация на частотах 74, 365 МГц и 1.4, 4.85 ГГц, с 33 известными радиогалактиками с  $Z>3$ . Обнаружилось, что далекие объекты по величине индексов занимают выделенную область. Из исследуемого списка мы выбрали те радиоисточники, у которых величина спектрального индекса попадает в те же области, что и у галактик с большим красным смещением. Две трети из этих источников входят в SS-выборку каталога RC и для большей части из них определены красные смещения ( $Z^{median}=0.82$ ) [46], причем объекты с неизвестным  $Z$  слабее по блеску и меньше по угловым размерам. Последняя группа по видимой звездной величине на диаграмме  $Z-R$  (Рис. 5) для каталога RC занимают область с  $Z \geq 1.5$ , то есть это, скорее всего, достаточно далекие галактики. Из сравнения спектральных индексов исследуемых источников и далеких радиогалактик мы заключили, что форма радиоспектра в диапазоне 74 —

4850 МГц может давать уточняющую информацию для выбора кандидатов в далекие объекты.

Таблицы, включающие результаты оптического отождествления 320 радиоисточников каталога RC с SDSS, USNO-B1 и 2MASS, представлены в электронном виде по адресу <http://www.sao.ru/hq/zhe/RCoiRes.html> вместе с описанием.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Из-за большого объема и разнородности используемого материала, включающего 8 каталогов и 4 обзора, было бы невозможно произвести подготовку и анализ данных без применения новых программных средств, которые разрабатываются по стандартам IVOA, а именно Aladin [29], Vizier [56], TOPCAT [57], CasJobs [58].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №06-07-08062).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. S. Bennet, Mem.RAS. **68**, 163 (1962).
2. R. A. Laing et al., Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **204**, 151 (1983).
3. J. Kristian et al., Astrophys. J. **191**, 43 (1974).
4. G. G. Pooley et al., Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **224**, 847 (1987).
5. S. Rawlings et al., Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **279**, L13 (1996).
6. S. de Koff et al., Astrophys. J. Suppl. **107**, 621 (1996).
7. P. J. McCarthy et al., Astrophys. J. Suppl. **112**, 415 (1997).
8. A. R. Martel et al., Astronom. J. **115**, 1348 (1998).
9. G. Grueff & M. Vigotti., Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser. **20**, 57 (1975).
10. J. K. Katgert et al., IAU Symp. **74**, 165 (1977).
11. M. Irwin & R. McMahon, IAU Comm. 9 Newletters **2**, 31 (1992).
12. D. G. Monet et al., Astronom. J. **125**, 984 (2003).
13. J. E. Morrison et al., Astronom. J. **121**, 3, 1752 (2001).
14. А. Б. Берлин и др., Письма в АЖ **7**, 290 (1981).
15. А. Б. Берлин и др., Письма в АЖ **9**, 211 (1983).
16. Yu. N. Pariiskij et al., Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser. **87**, 1 (1991).
17. Yu. N. Pariiskij et al., Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser. **96**, 583 (1992).
18. V. V. Vitkovskij et al., Soobschenija SAO **53**, 86 (1987).
19. J. N. Douglas et al., Astronom. J. **111**, 1945 (1996).
20. Н. С. Соболева и др., Astronom. Zh. **71**, 684 (1994).
21. A. Fletcher et al., Astronomy Reports **40**, 759 (1996).
22. А. И. Копылов, Астрон. ж. **72**, № 4, 437 (1995).
23. Yu. N. Pariiskij et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **40**, 5 (1996).

24. O. V. Verkhodanov et al., Bull. Spec. Astrophys. Obs. **52**, 3 (2001).
25. B. M. Lasker et al., ASP Conf. Ser. **101**, 88 (1996).
26. K. Abazajian et al., Astronom. J. **129**, 1755 (2005).
27. R. H. Becker et al., Astrophys. J. **475**, 479 (1997).
28. J. J. Condon et al., Astronom. J. **115**, 1693 (1998).
29. F. Bonnarel et al., Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser. **143**, 33 (2000).
30. FIRST cutout service, <http://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/FIRST/>.
31. C. R. Lawrence et al., Astrophys. J. Suppl. **61**, 105 (1986).
32. P. N. Best et al., Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **346**, 627 (2003).
33. R. M. Cutri et al., The 2MASS all-Sky Catalog of Point Sources (2003).
34. O. P. Zhelenkova, A. I. Kopylov, Astrophysical Bulletin **63**, 369 (2008).
35. I. Csabai et al., Astronom. J. **125**, 580 (2003).
36. Collister, Lahav, Publ. Astronom. Soc. Pacific **116**, 818, 345 (2004).
37. J. H. Hewitt et al., Nature **333**, 537 (1988).
38. J. L. Tonry et al., Astronom. J. **119**, 1078 (2000).
39. C. S. Kochanek et al., Astrophys. J. **535**, 692 (2000).
40. C. J. Willott et al., Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **335**, 1120 (2002).
41. B. L. Fanaroff and J. M. Riley, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **167**, 31P (1974).
42. R. A. Windhorst et al., Astrophys. J. **289**, 494 (1985).
43. V. L. Afanasev et al., Astronomy Reports **47**, 377 (2003).
44. N. S. Soboleva et al., Astr. Lett. **26**, 623 (2000).
45. А. И. Копылов и др., Письма в АЖ **32**, 433 (2006).
46. А. И. Копылов, priv. (2007)
47. K. Jordi et al., Astronom. and Astrophys. **460**, 339 (2006).
48. G. Miley & De Breuck, C., arXiv:0802.2770 (2008).
49. R. G. McMahon et al., Astrophys. J. Suppl. **143**, 1 (2002).
50. Ž. Ivezić et al., Astronom. J. **124**, 2364 (2002).
51. M. Obrić et al., Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **370**, 1677 (2006).
52. F. K. Liu, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **347**, 1357 (2004).
53. C. C. Cheung, Astronom. J. **133**, 2097 (2007).
54. L. Lara et al., Astronom. and Astrophys. **348**, 699 (1999).
55. A. Mareski et al., Astronom. and Astrophys. **448**, 479 (2006).
56. F. Ochsenbein et al., Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser. **143**, 221 (2000).
57. M. B. Taylor, ASP Conf. Series **347**, 29 (2005).
58. A. R. Thakar et al., ASP Conf. Series **347**, 684 (2005).

## ANALYSIS OF A SAMPLE OF RC CATALOG OBJECTS IN THE REGION OVERLAPPING WITH THE AREAS COVERED BY FIRST AND SDSS SURVEYS. II: OPTICAL CROSS IDENTIFICATION WITH THE SDSS SURVEY AND USNO-B1 AND 2MASS CATALOGS

**O.P. Zhelenkova, A.I. Kopylov**

We report the results of optical cross identification of a sample of RC catalog radio sources with the FIRST and SDSS surveys. For 320 sources identified with NVSS and FIRST objects we perform optical cross identification with the SDSS survey. When selecting optical candidates we make maximum use of the information about the structure of radio sources as provided by FIRST survey images. We find optical candidates for about 70% of all radio sources.

Key words: *radiosources*