

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

*На правах рукописи*

УДК 524.7-13(083.8)

**ЖЕЛЕНКОВА Ольга Петровна**

**ОПТИЧЕСКОЕ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ  
РАДИОИСТОЧНИКОВ КАТАЛОГА RC**

(01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия)

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук

Нижний Архыз – 2007

Работа выполнена в Специальной Астрофизической Обсерватории  
Российской Академии Наук

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
А. И. КОПЫЛОВ

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
В. П. Решетников  
Санкт-Петербургский государственный  
университет

доктор физико-математических наук  
С. А. Трушкин  
Специальная Астрофизическая  
Обсерватория РАН

Ведущая организация: ПРАО АКЦ ФИАН,  
г. Пущино Московской обл.

Защита состоится “ 18 ” октября 2007 г. в 11 часов 30 минут на засе-  
дании Диссертационного совета Д 002.203.01 при Специальной Аст-  
рофизической Обсерватории РАН по адресу: 369167, КЧР, Зелен-  
чукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан “ 15 ” сентября 2007 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
кандидат физ.-мат. наук

МАЙОРОВА Е.К.

## Общая характеристика работы

### Актуальность

Исследования радиогалактик важны для понимания механизмов излучения внегалактических объектов в радиодиапазоне и относятся к широкому кругу задач, связанному с изучением проявлений активности галактических ядер (Rees, 1971; Begelman et al., 1984). По результатам современных наблюдений на космических и наземных телескопах подтверждаются предположения, на которых основываются унифицированные модели AGN (Active Galaxy Nuclear), объясняющие различия наблюдательных свойств галактик, в частности, мощных радиоисточников, ориентацией к лучу зрения (Barthel, 1989; Urry & Padovani, 1995, Dunlop et al., 2003). Изучение родительских галактик является важным для построения физических и эволюционных моделей источников, объяснения их связи с черными дырами (Silk & Rees, 1998). От малых до умеренных красных смещений ( $Z < 1$ ) мощные радиоисточники отождествляются с массивными эллиптическими галактиками gE (Best et al., 1998). Значительная часть этих объектов находится в скоплениях галактик. Высокий темп звездообразования, который предполагается для радиогалактик на  $Z \sim 4$  (Dey et al., 1997), ведет к сценарию, в котором эти объекты являются предшественниками gE на  $Z \sim 1$  (Röttgering et al., 1999).

Физические модели развития джета определяют возраст для больших радиоисточников (размерами  $\sim$  сотни кпк) в  $10^7$ – $10^8$  лет. Размер источника можно использовать как часы, отмеряющие время от момента начала активности в радиодиапазоне (Kaiser & Alexander, 1997). Взаимодействие джета с окружающей средой определяет морфологию радиоисточников. Сложная морфология так называемых "winged" и "x-shaped" радиоисточниках предположительно объясняется повторными фазами активности галактики в радиодиапазоне (Cheung, 2007).

Если продолжительность активности в радиодиапазоне для отдельной галактики оценивается в  $10^7$ – $10^8$  лет, то характеристическое время эволюции всей популяции AGN в целом на два порядка больше (Begelman & Cioffi, 1989). Известно, что пространственная плотность радиогалактик и других активных галактик увеличивается на два-три порядка от  $Z \sim 0$  к  $Z \sim 2 - 2.5$  (Dunlop & Peacock, 1990). Изучение всей популяции в целом несет информацию о

физических процессах, происходящих в окружении этих объектов на ранних стадиях эволюции Вселенной, поэтому важно получить представительные выборки далеких галактик. Хотя пространственная плотность мощных радиогалактик оценивается в  $10^{-6} \text{Mpc}^{-3}$  (Hawkins & Veron, 1993), но в радиодиапазоне их можно наблюдать практически на любом космологическом расстоянии.

Для повышения эффективности обнаружения далеких радиогалактик используются разные методики селекции. Так K-Z диаграмма, отражающая феноменологическую связь звездной величины в фильтре K и красного смещения для мощных радиогалактик, сохраняется даже до  $Z \sim 4 - 5$  (Rawlings et al., 1997). Техники селекции в оптическом диапазоне такие как, обнаружение Лаймановского скачка или эмиссий в линиях по показателям цвета (color-dropouts), узкополосные  $Ly_{\alpha}$  фильтры для прямых снимков, глубокая спектроскопия пустых полей позволяют обнаруживать галактики на больших красных смещениях до  $Z \sim 6$ . Поскольку радиогалактики обычно являются ярчайшими членами скоплений, при изучении окружения далеких радиогалактик с известным красным смещением возможно обнаружение соседних таких же далеких объектов, особенно, если наблюдается рентгеновское излучение от радиоисточника.

Известный эффективный метод по поиску далеких галактик основан на корреляции наблюдаемой крутизны радиоспектра и красного смещения (Miley, 1994), так подготавливаются SS (Steep Spectrum,  $\alpha > 0.9$ ) и USS (Ultra Steep Spectrum,  $\alpha > 1.3$ ) выборки по спектральному индексу, определенному в диапазоне от сотен МГц до ГГц. Этот метод не зависит от эффектов селекции в оптике. Именно при изучении USS выборки была обнаружена радиогалактика с рекордным красным смещением  $Z=5.19$  (van Breugel et al., 1999). Аналогичным подходом пользовались при составлении SS выборки каталога RC, которая исследовалась в программе “Большое Трио” (Госс и др., 1992), что привело к открытию радиогалактики с  $Z=4.51$ .

Чтобы эффективно использовать наблюдательное время при спектроскопических исследованиях оптических кандидатов, дополнительно проводят селекцию в по диаграмме Хаббла и/или цветовым показателям. Интересная техника поиска далеких радиогалактик состоит в поиске объектов, которые не отождествляются в оптике, с последующими наблюдениями в близком ИК диапазоне. Так в работе Schmidt et al. (2006) выборка радиоисточников обзора DRaGONS составлена из не отождествившихся по суммированным кад-

рам в  $g$ ,  $r$ ,  $i$  фильтрах обзора SDSS (предельная глубина по уровню  $2\sigma$   $m \sim 24.1^m$ ) источников.

Информация о структуре и механизмах излучения радиоисточника может быть получена из его спектра, поляризационных характеристик и морфологии, но только с помощью оптических данных оценивается расстояние и уверенно классифицируется объект. С уменьшением плотностей потока количество оптических отождествлений для радиоисточников быстро падает и составляет от  $\sim 40\%$  (для  $S_{408\text{MHz}} \sim 250$  мЯн; Grueff & Vigotti, 1975) до  $\sim 20\%$  ( $S_{1415\text{MHz}} \sim 10$  мЯн; Katgert et al., 1977) до предела POSS  $\sim 20.5^m$ . Чтобы выполнить отождествление списка радиоисточников с предельными потоками 10-20 мЯн, необходимы глубокие прямые снимки (до  $25^m - 26^m$ ).

Оптическое отождествление радиоисточников требует значительных затрат наблюдательного времени. Его надежность зависит от точности астрометрической привязки снимков, на которую влияет количество и распределение опорных звезд по снимку, их звездные величины. Неравномерное расположение опорных звезд искажает масштаб координатной сетки и, как следствие, приводит к ее смещению относительно реального положения. Большие телескопы обычно имеют небольшое поле зрения ( $\sim 10' - 20'$ ), поэтому до появления больших каталогов с высокой поверхностной плотностью объектов было проблематично обеспечить секундную и лучшую точность координатной сетки в оптике.

Одних только координат радиоисточника часто недостаточно для оптического отождествления, и необходима информация о детальной структуре источника, поскольку положение оптического кандидата не всегда совпадает с максимумом потока в радиодиапазоне, как, например, для двойных радиоисточников FR II типа (Fanaroff & Riley, 1974). При наличии нескольких кандидатов для выбора родительской галактики привлекается любая дополнительная информация о свойствах оптических объектов, как-то: спектральная, фотометрическая, тип объекта и т.п.

В конце 20 - начале 21 века в связи с быстрым ростом информации, накапливаемой в постоянно увеличивающемся числе цифровых обзоров и каталогов, произошло разделение методов исследования радиоисточников. Вместе с традиционно используемым подходом, который состоит в детальном изучении небесного объекта и получении максимальной информации о нем, стал развиваться второй

подход, нацеленный на изучение статистических свойств популяции радиоисточников. Сбор информации даже об одном небесном объекте - трудоемкая работа из-за большого количества ресурсов, способов доступа к данным, форматов получаемых результатов. Развитие программных систем, проводящих вычисления в Интернете, позволяет существенно облегчить подобную работу, но использование новых средств влияет на постановку задач и методы их решения.

Установление соответствия между объектами астрономических каталогов в разных диапазонах электромагнитного спектра и объединения их в астрофизический источник имеет очевидный интерес. Обычно кросс-идентификация каталогов в радиодиапазоне осложнена их разным угловым разрешением и предельной чувствительностью, а также спектром объектов в радиодиапазоне. Отождествление радиоисточников в оптике часто затрудняется многокомпонентной структурой и/или большими угловыми размерами радиоисточника, а также недостаточной координатной точностью и низким угловым разрешением отдельных радиокаталогов. Поэтому автоматическая кросс-идентификация радиокаталогов не дает такого же высокого процента совпадений, как в оптике. Она не применялась для массового оптического отождествления радиоисточников до появления первых радиообзоров с угловым разрешением достаточным для оптических отождествлений таких, как NVSS (Condon et al., 1998) и FIRST (Becker et al., 1997). Именно с них и началось массовое отождествление радиообзоров (McMahon et al., 2002; Magliocchetti & Maddox, 2002; Ivezić et al., 2002).

Деятельность астрономического сообщества по созданию информационной инфраструктуры, повышающей эффективность работы с астрономическими данными, координирует Международный альянс "Виртуальная Обсерватория" (International Virtual Observatory Alliance) (Quinn et al., 2004). На основе стандартов, разработанных IVOA, созданы программные средства для работы с данными в Интернете, такие как, Astrogid (Walton et al., 2006) и Aladin (Ochsenbein et al., 2005), TOPCAT (Taylor, 2005).

Решение некоторых астрофизических задач невозможно без реализации запросов к разнородным источникам информации и анализа больших объемов данных. Типичные действия, производимые при извлечении информации из www-ресурсов, сравнения полученных данных и визуализации результатов, можно представить в виде последовательности взаимосвязанных простых задач. В системе

AstroGrid реализована функциональность, обеспечивающая выполнение таких сценариев или потоков работ. Отождествление радиоисточников, хотя эта процедура не является простой задачей для автоматизации, можно также рассматривать как некую последовательность действий, которую можно формализовать как поток задач.

По разным оценкам доля точечных однокомпонентных радиоисточников для каталога FIRST (угловое разрешение  $<5''$ ), которые легко отождествляются программными средствами, составляет от 60% (Cress et al., 1996) до 90% (Ivezić et al., 2002). Но отождествление радиоисточников более сложной структуры, например двойных, требуется усовершенствования алгоритмов кросс-идентификации, а именно поиска соотношений между свойствами объектов, как, например, корреляция плотности потока радиокомпонент и расстояния между ними и родительской галактикой (Губанов и др., 2003). При сравнении радиоисточников в полных выборках между собой или с известными далекими радиоисточниками возможно обнаружение эмпирических корреляций между параметрами объектов, чем можно воспользоваться при составлении поисковых списков, а также в алгоритмах кросс-идентификации.

### **Цель и задачи исследования**

Радиогалактики являются реперами, позволяющими изучать Вселенную на разных космологических масштабах (вплоть до  $Z \sim 5-6$ ), поэтому важно получить представительные выборки этих редких объектов. Поскольку только по спектральным данным в оптике оценивается космологическое расстояние, то обнаружение родительских галактик радиоисточников является обязательным шагом в их изучении.

Целью данной диссертационной работы является оптическое отождествление выборки источников с крутыми спектрами каталога RC ( $\alpha > 0.9$ ) по радиокартам VLA (NRAO, США) с секундным угловым разрешением и наблюдательному материалу, полученному на БТА по программе поиска далеких галактик “Большое Трио”.

С появлением новых глубоких обзоров, а именно FIRST и SDSS, появилась возможность отождествить треть источников каталога RC, предварительно уточнив их координаты, а затем сравнить свойства в радио и оптике.

В работе особое внимание уделяется поиску возможных корреляций между параметрами источников, применимости новых программных средств и алгоритмов для автоматического отождествления радиоисточников.

### Научная новизна

1. По прямым ПЗС снимкам, полученным на БТА, и радиокартам VLA высокого углового разрешения впервые выполнено оптическое отождествление выборки радиоисточников с крутыми спектрами ( $\alpha > 0.9$ ) каталога RC, что позволило для отождествленных объектов выполнить фотометрические и спектральные исследования родительских галактик, определить красные смещения для 70% из них, а также обнаружить далекую галактику ( $Z=4.51$ ) с экстремально мощным радиоизлучением, одну из семи известных радиогалактик с  $Z > 4$ .

2. Впервые в области каталога RC, совпадающей с обзорами FIRST и SDSS, выполнены отождествления с пятью радиокаталогами, проведена морфологическая классификация и оценка угловых размеров, определено соотношение однокомпонентных и многокомпонентных радиоисточников. На основе двух полных выборок каталога RC из центральной части обзора "Холод" (у первой выборки предел по плотности потока –  $S_{3.9GHz} \geq 13 \text{ мЯн}$ , второй –  $S_{3.9GHz} \geq 30 \text{ мЯн}$ ) проведено сравнение спектральных индексов радиоисточников и проанализировано поведение спектров на частотах 74 МГц – 365 МГц – 1.4 ГГц – 4.85 ГГц. Выполнено сравнение двухчастотных спектральных индексов радиоисточников каталога RC и известных радиогалактик с  $Z > 3$ .

3. Впервые для 320 радиоисточников каталога RC, с уточненными по NVSS и FIRST координатами, проведено оптическое отождествление с обзором SDSS. Доля отождествлений составляет  $\sim 70\%$ . Сравнение двух полных, ограниченных по плотности потока, выборок показало, что отношение неотожествленных источников EF и отождествленных STAR и GALAXY (классификация SDSS) составляет  $\sim 1 : 1.3 : 2.6$  и сохраняется как в первой, так и во второй выборке. Доля объектов с крутыми и ультра крутыми спектрами у объектов EF заметно выше, чем у отождествленных источников. Квазары с  $Z > 1.5$  (спектральные красные смещения из обзора SDSS, Adelman-McCarthy et al., 2007) являются точечными источниками с



плоскими спектрами и угловыми размерами  $\leq 2''$ .

### Научная и практическая значимость работы

1. Разработана методика оптического отождествления радиоисточников по прямым ПЗС-сняткам БТА и радиокартам с высоким угловым разрешением. При использовании в качестве опорных координатных каталогов USNO-A2, USNO-B1, SDSS средняя точность координатной привязки составила  $0.25''$ . Выполнено оптическое отождествление 100 радиоисточников SS выборки каталога RC.

2. С появлением на рубеже веков больших цифровых обзоров и развитием программных систем нового поколения возникли новые возможности для применения статистического подхода в изучении свойств популяций объектов. Проанализирована применимость алгоритмов кросс-идентификации и проведено тестирование современных программных средств для массового отождествления списков радиоисточников с невысокой координатной точностью (на примере каталога RC). Реализована автоматическая подготовка разнородных данных для оптического отождествления списка радиоисточников с использованием программных средств AstroGrid (Walton et al., 2005) и Aladin (Bonnarel et al., 2000). Для эффективной работы с разнородными таблицами, содержащими результаты отождествления радиоисточников каталога RC, разработана схема таблиц базы данных.

3. Разработана методика отождествления радиоисточников каталога RC с радиообзорами. С использованием данных обзора FIRST по отождествленным радиоисточникам определено, что однокомпонентные объекты составляют  $\sim 55\%$ , двухкомпонентные  $\sim 30\%$ , а с большим числом компонентов  $\sim 15\%$ .

4. Для 320 радиоисточников с уточненными по каталогу NVSS координатами проведено оптическое отождествление с обзорами SDSS, USNO-B1, 2MASS. Оптическое отождествление основывалось на морфологическом типе радиоисточников, определенном по радиокартам FIRST, и информации об оптическом кандидате из обзора SDSS.

Результаты сравнения двух выборок, могут использоваться для поиска соотношений между свойствами радиоисточников и уточнения алгоритмов кросс-идентификации каталогов, а также составления поисковых списков объектов.

### Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика оптического отождествления по прямым снимкам и радиокартам с секундным угловым разрешением

2. Оптическое отождествление 100 радиоисточников из выборки с крутыми спектрами каталога RC.

3. Результаты отождествления 432 источников каталога RC в области пересечения с обзорами SDSS, FIRST (R.A. 2000.0 = 8h11m – 16h25m) с радиокаталогами TXS, NVSS, FIRST, VLSS, GB6 и обзором SDSS и каталогами USNO-B1, 2MASS в оптике.

4. Морфологическая классификация, определение угловых размеров 320 отождествленных с NVSS и FIRST радиоисточников. Результаты сравнения свойств радиоисточников из двух ограниченных по плотности потока выборок.

### Апробация результатов

Основные результаты диссертации докладывались на общих семинарах и конкурсах научных работ САО РАН, а также на конференциях:

- 1987** XIX Всесоюзная конференция по галактической и внегалактической радиоастрономии, Таллин;
- 1991** XXIII Всесоюзная радиоастрономическая конференция, Ашхабад;
- 1995** XXVI радиоастрономическая конференция, Санкт-Петербург;  
175 Симпозиум МАС “Extragalactic radio sources”, Италия;
- 1997** XXVII радиоастрономическая конференция, Санкт-Петербург;  
JENAM-97, Греция
- 1999** Всероссийская конференция “Астрофизика на рубеже веков”, ПРАО;  
VIII Российско-финнский симпозиум по астрофизике, Санкт-Петербург;  
199 Симпозиум МАС, Индия;
- 2000** JENAM-2000, Москва;

- 2001** Всероссийская астрономическая конференция, Санкт-Петербург;  
JENAM-2001, Германия;  
Коллоквиум МАС 184, Армения;
- 2002** XX Всероссийская астрономическая конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пущино;  
ESO/ESA/NASA/NSF астрономическая конференция “Toward an International Virtual Observatory”, Германия;
- 2004** ADA-III: Astronomical Data Analysis Conference, Италия;
- 2005** ADASS-XV, Испания;
- 2006** Виртуальная обсерватория: научные проблемы и методы их решения, Москва;  
IVOA Interoperability Meeting and Small Project Meeting, Москва;  
235 Симпозиум МАС, 2006, Прага.

## Содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложений. Она содержит 200 страниц, 12 таблиц, 32 рисунка и 4 приложения. Список литературы включает 211 ссылок.

Во **введении** обсуждается актуальность работы, определяются ее цели и задачи, научная новизна и практическая значимость, формулируются положения выносимые автором на защиту. Приведены апробация результатов, список работ, в которых опубликованы результаты диссертации, личный вклад автора, а также представлено содержание диссертации.

В **первой главе** описана методика координатной привязки прямых фотографических снимков БТА по вторичным астрометрическим стандартам и процедура оптического отождествления радиоисточников по координатному совпадению. Для первой программы отождествления источников РАТАН-600 по фотографическим снимкам БТА применена методика координатной привязки с использованием известного метода Тернера, который состоит в определении модели координатной сетки прямого снимка (постоянных пластинки) решением методом наименьших квадратов системы уравнений, связывающих измеренные и идеальные (тангенциальные) координаты опорных стандартов. До появления больших каталогов с высокой поверхностной плотностью объектов было проблематично обеспечить

необходимое количество опорных стандартов в небольшом поле зрения БТА ( $\sim 10'$ ), поэтому координатная привязка проводилась в два этапа. Сначала по фотографическим копиям POSS (в некоторых случаях по Таутенбургским пластинкам) и опорному каталогу (SAO или AGK3) определялись вторичные стандарты, а затем по ним выполнялась привязка прямых снимков.

Обычные методы редукции недостаточны, чтобы полностью учесть локальные ошибки координат на пластинках телескопов системы Шмидта. Они также имеются в каталогах и цифровых обзорах, полученных на основе POSS. Эти ошибки переносятся в координаты вторичных стандартов и тогда, кроме случайной погрешности координат, может присутствовать близкая к этому значению систематическая ошибка, приводящая к сдвигу координатной сетки на привязываемых снимках. Неравномерное распределение опорных звезд по области дает искажение масштаба по координатным осям. Эту ошибку можно контролировать сравнением значений масштаба осей. Если имеется отличие между осями большее, чем 2–3%, то при совмещении оптических и радио изображений их координатные сетки могут быть сдвинуты друг относительно друга (до нескольких угловых секунд). Наиболее оптимально для привязки снимков БТА использовать 5–7 опорных объектов.

Положение оптического кандидата определялось наложением на фотоснимок палетки с отмеченными опорными звездами и положением радиоисточника. Кандидатом для оптического отождествления считался объект, попадающий в область радиусом равную утроенному нормализованному расстоянию. Для определения постоянных пластинки, масштаба изображения, координат измеренных объектов, разрисовки прозрачной палетки разработаны программы на Fortran-IV.

Проведенное повторное отождествление 37 радиоисточников по уточненным по каталогу NVSS координатам еще раз подтвердило, что для оптического отождествления радиоисточников необходима точность радиокоординат  $\sim 1''$  и такая же точность координатной привязки оптических изображений.

**Вторая глава** посвящена оптическому отождествлению выборки источников с крутыми спектрами каталога RC (программа “Большое Трио”, поиск далеких галактик) по наблюдательному материалу, полученному на БТА и VLA. В SS выборку вошли 104 FR II радиоисточника со спектральным индексом  $\alpha > 0.9$ . Кроме коорди-

натного совпадения, при отождествлении двойного или многокомпонентного источника необходима информация о его детальной структуре и модельное представление, объясняющее сложную форму. У радиоисточников с крутыми спектрами родительские галактики чаще всего являются слабыми объектами в оптике ( $R \sim 22^m - 25^m$ ), и используемые для отождествления глубокие снимки имеют высокую поверхностную плотность объектов. При повышении точности координатной привязки размеры области поиска уменьшаются, и вероятность ложного отождествления снижается. Следует отметить, что определение координат вторичных стандартов только по координатной сетке пластинок DSS-I/DSS-II не является надежным, и требуется корректирующая привязка областей DSS по каталогам USNO. Было выполнено три итерации координатной привязки прямых снимков БТА. С появлением каталога USNO-B1 практически исчезла необходимость определения вторичных стандартов. Окончательная привязка ПЗС-кадров выполнена по USNO-B1 и DSS-II. Для части источников использовался SDSS.

Обработка наблюдательных данных, мозаичные изображения, астрометрическая привязка, визуализация результатов производилось системой MIDAS (Banse et al., 1999) с помощью разработанных программ на командном языке MCL. Астрометрическая привязка и составные изображения радио-оптика для отождествления радиоисточников сделаны пакетом GAIA системы Starlink (Draper, 2000). Для оптического отождествления использовались составные изображения из оптического кадра и радиокарты с высоким угловым разрешением ( $< 5''$ ). В сложных случаях для отождествления привлекалась дополнительная фотометрическая информация.

В результате отождествлено 100 радиоисточников SS выборки. Средняя точность привязки по всей выборке составила  $0.25''$ . Методом отношения максимального правдоподобия определены полнота и надежность отождествления, которые составили 99% и 95% соответственно. Медианное значение отношения осей  $b/a$  у 64 объектов оказалось равным 0.84, что с большой вероятностью позволяет отнести родительские галактики SS выборки к эллиптическим. Для отождествленных родительских галактик была выполнена широкополосная BVRI фотометрия. У  $\sim 70\%$  радиоисточников SS выборки определены спектральные и фотометрические красные смещения по наблюдательным данным БТА. В выборке отождествлены источники со сложной морфологией (X-shaped), объяснить которую можно

повторным зажиганием радиоисточника или резкой сменой оси вращения системы черная дыра — аккреционный диск из-за недавнего мерджинга (Cheung, 2007). Источник RC J0311+0508 оказался в SS выборке рекордным по  $Z = 4.514$ . Это мощная галактика, по радиосветимости превосходящая Cug A, одна из 7 известных радиогалактик с  $Z > 4$ .

В главе третьей рассматривается применение астрономических программных средств, разработанных на основе стандартов IVOA, для массового исследования радиоисточников. Описывается архитектура и стандарты сетевого взаимодействия на основе web-сервисов. Web-сервисы ConeSearch, используемые в программных приложениях IVOA для кросс-идентификации каталогов, реализуют поиск объектов по координатному совпадению в области заданного радиуса. Обычно эти web-сервисы успешно применяются при кросс-идентификации оптических каталогов или радиокаталогов с высокой координатной точностью и угловым разрешением. Выбор радиуса поиска является важным моментом, определяющим результат. Он зависит от статистических характеристик каталога, то есть поверхностной плотности объектов, медианного значения размеров радиоисточников (McMahon et al., 2002; Ivezić et al., 2003). Отождествление изолированных двойных радиоисточников (со структурой core-lobe и double-lobe) производится дополнительным проходом списка обнаруженных пар ближайших соседей. Параметры такого поиска (расстояние между ближайшими соседями, радиус поиска для средней точки между компонентами) определяются для каждого радиокаталога индивидуально. Радиоисточники, состоящие из трех и более компонент, не отождествляются автоматически.

Другой алгоритм кросс-идентификации радиокаталогов применяется в пакете SPECFIND. В нем учитывается при расчете координатного совпадения угловое разрешение, размеры и ориентация источника, а также плотность потока и радиоспектр (Vollmer et al., 2005a). SPECFIND используется для определения спектральных индексов радиоисточников.

Из-за недостаточной для оптического отождествления координатной точности и углового разрешения проблематично отождествить автоматически каталог RC. При кросс-матчинге RC с другими радиокаталогами получается низкий процент совпадений из-за того, что для него не подходят основные предположения, заложенные в алгоритмах ConeSearch и SPECFIND.

Если каталог имеет координатную точность недостаточную для оптических отождествлений (хуже угловых секунд), то в область поиска, размер которой зависит от координатных ошибок, попадает несколько оптических объектов, и чтобы выбрать из них наиболее подходящий, нужна дополнительная информация. Спектральное распределение энергии далеких радиогалактик смещено в красную область спектра, что отражается на показателях цвета объекта. Именно это использовалось в качестве селекционного ограничения в задаче поиска далеких галактик по источникам каталога RC с помощью системы AstroGrid. Поток задач, разработанный для поиска далеких галактик, был реализован на узле AstroGrid, развернутом в ИПИ РАН. Задача, прежде всего, была нацелена на освоение новых технологий работы с данными в Интернете. Для получения научного результата требуется дальнейшее развитие потока задач и усовершенствование алгоритмов кросс-идентификации.

Для отождествления каталога RC с выбранными 8 каталогами и 5 обзорами, была автоматизирована подготовка данных с помощью программного интерфейса Aladin. Спектральные и фотометрические красные смещения отождествленных источников были извлечены из базы данных SDSS с помощью SQL-интерфейса CasJobs. Для работы с результирующими таблицами использовался редактор таблиц TOPCAT (Taylor, 2005). Было проведено несколько итеративных проходов списка для отождествления источников. Объем и разнородность полученных данных усложнили работу с версиями таблиц, поэтому была разработана и реализована схема таблиц базы данных с результатами оптического отождествления источников каталога RC, поскольку системы управления реляционными базами данных являются удобным инструментом для хранения, обновления и реализации запросов к табличной информации.

В **четвертой главе** описывается методика и обсуждаются результаты отождествления 432 радиоисточников каталога RC, попавших в область пересечения обзора “Холод” с FIRST и SDSS. Для отождествления радиоисточников использовались данные из нескольких каталогов и обзоров в радиодиапазоне от 74МГц до 4.85ГГц, а именно: VLSS, TXS, NVSS, FIRST, GB6. Уточнение координат каталога RC было выполнено по каталогам NVSS и FIRST. Отождествление проводилось по совмещенным контурным картам NVSS и FIRST с отмеченными положениями источников из выбранных каталогов, предварительно подготовленных в стеках Aladin, и

по атласу полосы обзора “Холод” (Копылов, 2007). 320 радиоисточников отождествились с NVSS, FIRST и выбранными каталогами.

Для сравнения спектральных свойств, морфологии, угловых размеров были взяты источники, располагающиеся в центральной части обзора “Холод”, где обеспечивается  $\sim 100\%$  полнота каталога. Рассматривались две выборки. Одна, более глубокая по плотности потока, включила 131 объект с плотностью потока  $S_{3.9GHz} \geq 13 \text{ мЯн}$  в  $10'$  центральной полосе по склонению. Во вторую вошли 112 источников с  $S_{3.9GHz} \geq 30 \text{ мЯн}$  в  $20'$  центральной полосе. Оценена доля однокомпонентных и многокомпонентных радиоисточников и проведена классификация по морфологическому типу на основе радиокарт обзора FIRST. Однокомпонентных источников оказалось  $\sim 55\%$ , двухкомпонентных  $\sim 30\%$ , трехкомпонентных  $\sim 10\%$  и с большим числом —  $\sim 5\%$ , то есть доля радиоисточников, отождествление которых проблематично программными средствами, составляет  $\sim 15\%$ .

По спектральному индексу на частотах 1.4 ГГц–4.85 ГГц источники в двух выборках были разделены на 4 группы: инверсные I со спектральным индексом  $\alpha < -0.1$ , плоские F с  $0.1 \leq \alpha \leq 0.5$ , крутые S с  $0.5 \leq \alpha \leq 1$  и ультра крутые U — с  $\alpha \geq 1$ . Сравнение спектров показало, что в первой более слабой по плотности потока выборке число источников с инверсными и плоскими спектрами немного больше, а число источников с ультра крутыми спектрами меньше по сравнению со второй выборкой. Источники с плоскими и инверсными спектрами оказались более компактными по угловым размерам, чем источники с крутыми и ультра крутыми спектрами.

Проведено сравнение поведения спектров объектов двух выборок по двухчастотным спектральным индексам в радиодиапазоне от 74 МГц до 4.85 ГГц. Спектры инверсные на низких частотах, становящиеся крутыми к высоким частотам редко встречаются ( $\sim 3\%$ ), хотя рекордная по красному смещению радиогалактика ( $Z=5.199$ ) имеет такую форму спектра. Крутых спектров, становящихся плоским к высоким частотам, также немного ( $\sim 8\%$ ). Большая часть источников имеет крутой спектр с незначительным уменьшением или увеличением спектрального индекса к более высоким частотам ( $\sim 70\%$ ). Спектров плоских на 74 МГц–365 МГц и становящихся крутыми к 1.4 ГГц, 4.85 ГГц достаточно много ( $\sim 20\%$ ).

Для радиоисточников, которые отождествились на трех или четырех частотах, вычислены двухчастотные спектральные индексы



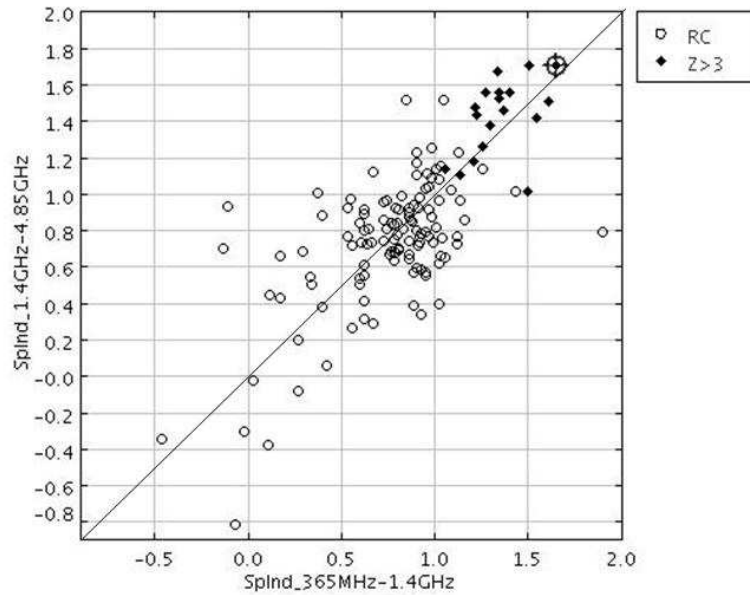


Рис. 1: Распределение двухчастотных спектральных индексов, для выборки каталога RC (пустые кружки) и радиогалактик с  $Z > 3$  (черный цвет). Кружочком отмечена радиогалактика с рекордным красным смещением  $Z=5.199$  (van Breugel et al., 1999)

и проведено сравнение с радиогалактиками с  $Z > 3$  (по данным из NED). Поведение двухчастотных спектральных индексов радиогалактик с большим красным смещением отличается от большинства источников выборки каталога RC (см. рис. 1). Вероятно, селекцию кандидатов в поисковый список далеких радиогалактик можно провести более жестко, используя эту дополнительную информацию.

По контурным картам FIRST мы провели морфологическую классификацию 320 источников, взяв за основу схему из работы Lawrence et al. (1986). В некоторых случаях именно по морфологическому типу определялось оптическое отождествление. Точечные или ядерные источники (core) составляют  $\sim 40\%$  выборки, их угловые размеры  $< 2''$ . Приблизительно половина из них имеет инверсные и плоские спектры, среди них мало источников с ультра крутыми спектрами (разделение спектров на типы по спектральному индексу на 1.4 ГГц–4.85 ГГц). CJ (core-jet) —  $\sim 7\%$ , из которых две трети источников имеет крутые спектры, но ультра крутых спектров нет. CL (core-lobe) —  $\sim 5\%$ , распределение по спектрам похоже на CJ. DC (double-core), D (double-lobe), DD (double-double) —  $\sim 40\%$ , спектры в основном крутые, значительная доля ультра крутых, мало

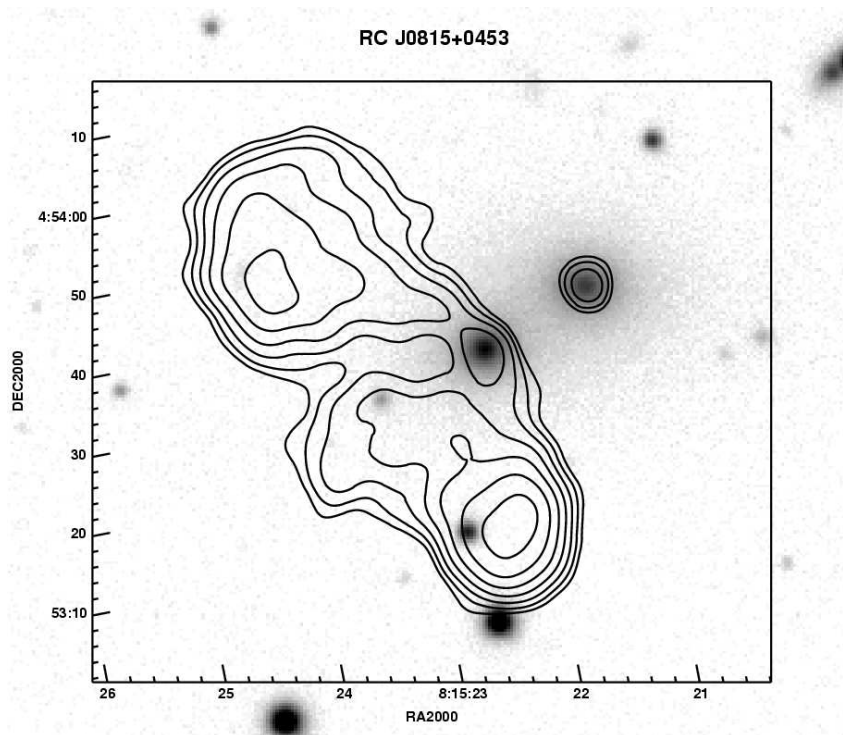


Рис. 2: RC J0815+0453. Два соседних радиоисточника, отождествляющихся с эллиптическими галактиками

плоских и инверсных. Тройные Т (triple) —  $\sim 6\%$ . Имеется небольшое количество радиоисточников ( $< 10\%$ ), которые можно отнести к “winged” или “X-shaped” источникам, являющимися небольшой интересной популяцией радиогалактик, необычная структура которых может быть вероятным следствием недавнего мерджинга. На рис. 2 представлен пример интересного радиоисточника. Для объяснения расположения двух эллиптических галактик и двух радиоисточников, которые с ними отождествляются необходимы спектральные исследования.

$\sim 70\%$  радиоисточников из тех, для которых уточнены координаты по NVSS и FIRST, отождествились с оптическими кандидатами в обзоре SDSS. При подсчете объектов (классификация на “STAR” и “GALAXY” в SDSS), с которыми отождествились радиоисточники, получилось, что соотношение 1:2 (STAR:GALAXY) сохраняется в двух полных выборках из центральной части каталога RC, так же, как и доля не отождествившихся источников ( $\sim 20\%$ ).

Хуже всех отождествляются точечные (C) источники. Двойные радиоисточники (D, DC, DD) отождествляются в основном с галактиками. Для CJ, CL, T доля отождествлений выше, чем для точечных

и двойных радиоисточников.

Для 320 радиоисточников, с учетом отождествлений SS выборки, попавших в исследуемую область, доля объектов, для которых обнаружены оптические кандидаты, составляет 84%.

В **заключении** сформулированы основные выводы диссертации, а также выражена благодарность и признательность научному руководителю Копылову А.И., Парийскому Ю.Н., Витковскому В.В., Гаген-Торну В.А. Особую признательность автор выразил своим близким за помощь и поддержку, коллегам по работе, особенно Пляскиной Т.А. за помощь в оформлении.

В **приложении** приводятся таблицы с результатами отождествлений, пример потока работ для системы AstroGrid., описание таблиц схемы базы данных с результатами отождествлений.

### Публикации по теме работы

Основные результаты диссертации опубликованы в двадцать одной работе, из которых четырнадцать представляют собой статьи в рецензируемых журналах, четыре - труды международных конференций, два препринта и одна брошюра.

1. Vitkovskij V.V., Zhelenkova O.P., Karachentsev I.D., Parijskij Yu.N., Tikhonov N.A., Shergin V.S. The 6-m Telescope Programme of Optical Identification of the Radio Sources Found in the Deep Surveys with the RATAN-600 Radio Telescope. Soobschenija SAO, 1987, 53, 86-88.

2. Госс В.М., Парийский Ю.Н., Соболева Н.С., Темирова А.В., Витковский Вал.В., Желенкова О.П., Наугольная М.Н. Исследования выборки RC-каталога (РАТАН-600) с крутыми спектрами ( $\alpha > 1.1$ ): наблюдения на VLA и оптические отождествления, 1992, АЖ, 69, 673-694.

3. Копылов А.И., Госс В.М., Парийский Ю.Н., Соболева Н.С., Желенкова О.П., Темирова А.В., Витковский Вал.В., Наугольная М.Н., Верходанов О.В. Оптическое отождествления подвыборки радиоисточников RC-каталога с крутыми спектрами с помощью 6-м телескопа SAO РАН. Оптические наблюдения, АЖ, 72, 613-629.

4. Копылов А.И., Госс В.М., Парийский Ю.Н., Соболева Н.С., Желенкова О.П., Темирова А.В., Витковский Вал.В., Наугольная М.Н., Верходанов О.В. Оптическое отождествление подвыборки радиоисточников с крутыми спектрами из каталога RC на 6-м теле-

скопе САО. Требования к координатной точности и глубине VLA изображений и методы оценки фотометрического красного смещения, АЖ, 1995, 72, 437-446.

5. Parijskij Yu.N., Kopylov A.I., Goss W.M., Soboleva N.S., Temirova A.V., Verkhodanov O.V., Zhelenkova O.P., Naugolnaya M.N., Investigation of RATAN-600 RC radio sources, 1996, Bull. SAO, 40, 5-124.

6. Parijskij Yu.N., Kopylov A.I., Goss W.M., Soboleva N.S., Temirova A.V., Verkhodanov O.V., Zhelenkova O.P., and Cherpurnov A.V. RATAN-600 and the early Universe, 1999, Astron. and Astroph. Tr., 18, 61-65.

7. Парийский Ю.Н., Госс В.М., Копылов А.И., Соболева Н.С., Темирова А.В., Верходанов О.В., Желенкова О.П. Завершение оптического отождествления объектов выборки RC-каталога с ультракороткими спектрами и оценка их красных смещений, 1998, АЖ, 75, N4, 483-497.

8. Pursimo T., Nilsson K., Teerikorpi P., Kopylov A.I., Soboleva N.S., Parijskij Yu.N., Verkhodanov O.V., Temirova A.V., Zhelenkova O.P., Goss W.M., Baryshev Yu.N., Sillapaa A., Takalo L.O. Optical morphology of distant RATAN-600 radio galaxies from subarcsecond resolution NOT images, 1999, A&AS, 134, 505-521.

9. Додонов С.Н., Парийский Ю.Н., Госс В.М., Копылов А.И., Соболева Н.С., Темирова А.В., Верходанов О.В., Желенкова О.П. "Большое Трио": спектроскопия выборки объектов каталога RC, 1999, АЖ, 76, 323-332

10. Верходанов В.В., Копылов А.И., Парийский Ю.Н., Соболева Н.С., Желенкова О.П., Темирова А.В., Уинн Дж., Флетчер А., Берк Б. Радиогалактика RC J1148+055, 2000, ПАЖ, 26, 493-498

11. Соболева Н.С., Госс У.М., Верходанов В.В., Желенкова О.П., Темирова А.В., Копылов А.И., Парийский Ю.Н. RC 0105+0501 - радиогалактика с красным смещением  $z \sim 3.5$ , 2000, ПАЖ, 26, 723-728

12. Verkhodanov O.V., Kopylov A.I., Zhelenkova O.P., Verkhodanova N.V., Chernenkov V.N., Parijskij Yu.N., Soboleva N.S., Temirova A.V. Creation of a database of spectral energy distributions of radio galaxies, 2000, Baltic Astronomy, 9, 668-669

13. Verkhodanov O.V., Parijskij Yu.N., Soboleva N.S., Kopylov A.I., Temirova A.V., Zhelenkova O.P., Goss W.M. Results of investigation of radio galaxies of survey "Cold": photometry, colour redshifts and the age of the stellar population, 2001, Bull. SAO, 52, 5-133.

14. Верховданов О.В., Копылов А.И., Парийский Ю.Н., Соболева Н.С., Темирова А.В., Желенкова О.П. Цветовые красные смещения и возраст звездного населения далеких радиогалактик RC-каталога. 2002, АЖ, 79, 589-600
15. Zhelenkova, O. P.; Vitkovskij, V. V., Data Fusion from Diverse Resources for Optical Identification of Radio Sources, ADASS XIII, ASP Conf. Proc., 2004, 314, 169-173
16. Briukhov D.O., Kalinichenko L.A., Zakharov V.N., Panchuk V.E., Vitkovsky V.V., Zhelenkova O.P., Dluzhnevskaya O.B., Malkov O.Yu., Kovaleva D.A. Information Infrastructure of the Russian Virtual Observatory (RVO). Second Edition. IPI RAN, 2005, 1-172.
17. Zhelenkova, O. P.; Vitkovskij, V. V.; Briukhov D.O., Kalinichenko L.A., Search of Distant Radio Galaxies as a Subject Mediator Example, ADASS XV, ASP Conf. Proc., 2006., 351, 244-247.
18. Kalinichenko L.A., Stupnikov S., Vovchenko A., Zakharov V.N., Zhelenkova O.P. Russian Virtual Observatory Community Centre for Scientific Problems Solving over Multiply Distributed Information Sources. Proc. RCDL VIII, 2006, 120-129.
19. Копылов А.И., М.Госс, Парийский Ю.Н., Соболева Н.С., Верховданов О.В., Темирова А.В., Желенкова О.П., RC J0311+0507- кандидат в самые мощные радиогалактики в Ранней Вселенной на красном смещении  $z=4.514$ , ПАЖ, 2006, 32, N7, 483-488.
20. Желенкова О.П., Копылов А.И., Изучение выборки каталога RC в области, совпадающей с обзорами FIRST и SDSS. I. Идентификация источников с радиокаталогами VLSS, TXS, NVSS, FIRST и GB6, 2007, препринт CAO РАН N217, 17с.
21. Желенкова О.П., Копылов А.И., Изучение выборки каталога RC в области, совпадающей с обзорами FIRST и SDSS. II. Оптическое отождествление с обзором SDSS, 2MASS и USNO-B1, 2007, препринт CAO РАН N218, 14с.

### **Личный вклад автора**

В перечисленных выше работах автору принадлежит:

*В работе [1]* участие в фотографических наблюдениях, разработка программного пакета для привязки прямых снимков, координатные измерения, оптическое отождествление.

*В работах [2-11,13, 14 и 19]* обработка наблюдений по программе “Большое Трио” и фотометрия (частично), астрометрическая при-

вязка радиоисточников SS выборки каталога RC, оптические отождествления (совместно с Копыловым А.И., определение координат родительских галактик.

*В работе [12]* создание раздела с результатами отождествления на сайте информационно-вычислительной системы "Эволюция радиогалактик" ([http://sed.sao.ru/rc\\_archive.html](http://sed.sao.ru/rc_archive.html)).

*В работах [15-18]* формализация задачи массового отождествления радиоисточников и определение потока задач для узла системы AstroGrid, развернутого в ИПИ РАН, разработка программы на языке Perl для автоматической подготовки данных

*В [20,21]* отождествление 432 источников каталога RC с обзорами FIRST и NVSS, каталогами TXS, NVSS, FIRST, VLSS, GB6 в радиодиапазоне и обзором SDSS и каталогами USNO-B1 и 2MASS в оптике (совместно с А.И. Копыловым).

## Список литературы

- Адельман-МакКарти и др. (Adelman-McCarthy et al), 2007, *VizieR: II/276*.
- Бансе и др. (Banse, K., Grosbol, P.J., Baade, D.), 1991, *ASP Conf. Series*, 25, 120
- Бартел (Barthel, P. D.), 1989, *ApJ*, 336, 606
- Бегелман, Киофи (Begelman, M.C.; Cioffi, D.F.), 1989, *ApJ*, v. 345, L21-L24.
- Беккер и др., (Becker R.H., Helfand D.J., White R.L. et al.), 1997, *Astrophys. J.* 475, 479
- Берлин А.Б. и др., 1984, *Сообщения САО*, 41, 4-85
- Бест и др. (Best, P.N.; Longair, M.S.; Roettgering, H.J.A.), 1998, *MNRAS*, 295, 549
- Бонарель и др. (Bonnarel et al.),
- Ван Брейгель и др. (van Breugel, W.; De Breuck, C.; Stanford, S. A.; et al.), 1999, *ApJ*, 518, L61-L64
- Госс М., Парийский Ю.Н., Соболева Н.С. и др., 1992, *Астрон. Ж.*, 69, 673-694.
- Губанов А.Г., Копылов А.И., Потапов А.С., 2003, *ПАЖ*, 29, 4, 264-276
- Данлоп и др. (Dunlop, J. S.; McLure, R. J.; Kukula, M. J. et al.), 2003, *MNRAS*, 340, 1095
- Данлоп, Пикок (Dunlop, J.S.; Peacock, J.A.), 1990, *MNRAS*, 247, 19
- Дей и др. (Dey, A.; van Breugel, W.; Vacca, W.D. et al.), 1997, *ApJ*,

- 490, 698
- Дрейпер (Draper, P.W.), 2000, ASP Conf. Proc., 216, 615
- Ивезич и др. (Ivezić, Z.; Menou, K.; Knapp, G. R. et al.), 2002, AJ, 124, 2364-2400
- Кайзер, Александер (Kaiser, C. R.; Alexander, P. A.), 1997, MNRAS, 286, 215
- Кресс и др. (Cress, C. M.; Helfand, D. J.; Becker, R. H. et al.), 1996, AJ, 473, 7
- Кондон и др., (Condon J.J., Cotton W.D., Greisen E.W. et al.), 1998, Astron. J. 115, 1693
- Копылов А. И., 2007, <http://www.sao.ru/hq/zhe/>
- Куин и др. (Quinn, P. J.; Barnes, D. G.; Csabai, I. et al.), 2004, SPIE Proc., 5493, 137-145
- Маглиочети, Мэдокс (Magliocchetti, M.; Maddox, S. J.), 2002, MNRAS, 330, 241
- МакМагон и др. (McMahon, R. G.; White, R. L.; Helfand, D. J. et al.), 2002, ApJS, 143, 1
- Мили (Miley, G.), 1994, ASP Conf. Series, 54, 385-395
- Оксенбайн и др. (Ochsenbein, F.; Fernique, P.; Bonnarel, F. et al.), 2005, ASP Conf. Ser., 347, 193
- Рис (Rees, M. J.), 1971, Proc. of a Study Week on Nuclei of Galaxies, 633.
- Ротгеринг и др. (Röttgering, H.; Best, P.; Pentericci, L.; Miley, G.), 1999, Proc. IAU Symp. 186, 471
- Роулинг и др. (Rawlings S., Blundell K.M., Lacy M., et al.), 1997, astro-ph/9704151
- Силк, Рис (Silk, J.; Rees, M. J.), 1998, A&A, 331, L1-L4
- Тейлор (Taylor, M.B.), 2005, ASP Conf. Ser., 347, 2
- Уолтон и др. (Walton, N. A.; Harrison, P. A.; Richards, A. M. S. et al.), 2005, ASP Conf. Ser., 347, 273
- Ури, Падовани (Urry, C. M.; Padovani, P.), 1995, PASP, 107, 803
- Фанароф, Рилей (Fanaroff, B.L.; Riley, J.M.), 1974, MNRAS, 167, 31
- Хоукинс, Верон (Hawkins, M.R.S.; Veron, P.), 2001, MNRAS, 260, 202
- Чеунг (Cheung, C.C), 2007, AJ, 133, 2097-2121
- Шмидт и др. (Schmidt, S. J.; Connolly, A. J.; Hopkins, A. M.), 2006, ApJ, 649, 63-78

Бесплатно

Ольга Петровна Желенкова

Оптическое отождествление радиоисточников каталога RC.

---

Зак. № 179с      Уч. изд. л. – 1.0      Тираж 100  
Специальная астрофизическая обсерватория РАН