

# Применение программных средств IVOA для исследования радиисточников

© Желенкова О.П., Копылов А.И., Черненко В.Н.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН  
zhe@sao.ru

## Аннотация

Установление соответствия между объектами астрономических каталогов в разных диапазонах электромагнитного спектра и объединения их в реальный астрофизический источник имеет очевидный научный интерес. Сбор информации даже об одном небесном объекте, несмотря на возможности, предоставляемые Интернетом, является трудоемкой работой из-за большого количества ресурсов, способов доступа к данным, форматов получаемых результатов, а также входных форматов программных приложений, используемых для дальнейшего анализа. Разработки астрономического сообщества по созданию на основе существующих WWW стандартов спецификаций, форматов и сервисов, повышающих эффективность работы с данными, координируются Международным альянсом «Виртуальная Обсерватория» (International Virtual Observatory Alliance). В рамках этой деятельности созданы системы, позволяющие реализовывать распределенные вычисления и доступ к данным. Анализируется применимость имеющихся программных средств IVOA для исследования списка радиисточников.

## 1 Введение

Астрономическое сообщество активно использует Интернет для доступа к астрономическим данным, поскольку изучение физики небесных объектов невозможно без сравнительного анализа наблюдательной информации, полученной в разных диапазонах электромагнитного спектра. Работы сообщества по созданию общей архитектуры информационного взаимодействия на основе спецификаций протоколов, сервисов, форматов и моделей данных координирует международный альянс - International Virtual Observatory Alliance (IVOA) (Quinn et al., 2004).

Создаваемая инфраструктура и новые возможности, предоставляемые ею для доступа и анализа научных данных, объединены общим названием - «виртуальная обсерватория» (ВО). Она значительно влияет на методологию научных

исследований. Базовой основой этой среды для европейских астрономов является система AstroGrid (Walton et al., 2006), разработанная в Великобритании. Астрономами UK определен набор научных задач «Top Ten», представляющий десять направлений астрофизических исследований в области физики звезд, галактик, межзвездной среды и солнца. Для их решения требуется информация из разнородных ресурсов с последующим анализом и визуализацией больших объемов данных. Астрономами предложены сценарии решения этих задач, как последовательности типичных действий, выполняемых с данными. На их основе и разработана функциональность, реализованная в AstroGrid. Система обеспечивает создание, выполнение и контроль потока работ, виртуальную память, доступ и визуализацию данных, а также интеграцию пользовательских данных и программ. Для разработки дополнительных приложений имеются программные интерфейсы к командной строке и языкам программирования perl, python, java.

Изучение радиисточников позволяет исследовать крупномасштабную структуру Вселенной и ее эволюцию на больших временных масштабах. В конце 20 – начале 21 века произошло разделение методов исследования радиисточников на два направления. Один подход, который применялся с самого начала радиоастрономических наблюдений и продолжает использоваться сейчас, состоит в детальном изучении источника, получении максимальной информации о нем. С появлением больших цифровых обзоров в разных спектральных диапазонах стал развиваться второй подход, который направлен на изучение статистических свойств популяции радиисточников.

С помощью программных средств ВО таких, как Datascope, Astroscope, Aladin, для одиночного объекта можно легко извлечь множество данных в разных спектральных диапазонах. Работа со списком объектов требует другого подхода, и функциональные возможности AstroGrid позволяют его реализовать.

В 2005-2006 гг в ИПИ РАН был создан узел AstroGrid как один из структурных элементов информационной инфраструктуры Российской виртуальной обсерватории (РВО) (Brukhov et al., 2005). В качестве демонстрационной задачи было предложено оптическое отождествление списка

радиоисточников для поиска кандидатов в далекие галактики (Zhelenkova et al., 2006). Совместными усилиями САО РАН и ИПИ РАН был реализован поток задач по кросс-идентификации каталога радиоисточников RC (Берлин и др., 1981), полученного на радиотелескопе PATAH-600, с радиообзорами NVSS (NRAO VLA Sky Survey) (Condon et al., 1998), FIRST (Faint Images of the Radio Sky at Twenty-centimeters) (Becker et al., 2003) и оптическим обзором неба SDSS (Sloan Digital Sky Survey) (Abazajian et al., 2005). На основе этого примера, производилось освоение и настройка системы, отладка потока работ и оценка применимости существующих web-сервисов для идентификации объектов RC (Kalinichenko et al., 2006).

Для оптических источников, у которых по сравнению с другими диапазонами электромагнитного спектра высокое угловое разрешение и точность координат, программная идентификация списка объектов с помощью web-сервисов ConeSearch, выполняющих поиск совпадений по координатам в области заданного радиуса (matching), дает высокий процент отождествлений. Такие сервисы имеются в системе AstroGrid, OpenSkyQuery, Aladin, TOPCAT. Процедура идентификации радиокаталогов не является простой. Угловые размеры радиоисточников варьируются от секунд до нескольких минут. Они могут иметь сложную многокомпонентную структуру. Это затрудняет не только оптическое отождествление, но и идентификацию объекта в радиообзорах с разным угловым разрешением. Радиоисточник из обзора с более низким разрешением может в каталоге с высоким разрешением состоять из нескольких объектов, которые являются его компонентами, или оказаться двумя или тремя разными источниками. Поэтому при разработке потока работ для поиска кандидатов в далекие радиогалактики принимались определенные упрощения (не рассматривалась структура объектов) с тем, чтобы получить вариант работающего демонстрационного примера. Дополнительная сложность состояла в том, что координатная точность каталога RC недостаточна для оптических отождествлений. Из-за этого задавался максимальный радиус поиска, и из объектов, попавших в поисковую область, отбирались те, которые удовлетворяли дополнительному селекционному критерию по показателям цвета. Чтобы использовать этот сценарий не только для поиска достаточно редких объектов, а для изучения всех радиоисточников списка было проведено детальное изучение каталога RC с тем, чтобы исходя из результатов, внести изменения в разработанный поток задач.

## 2 К вопросу оптического отождествления радиоисточников

Хотя значительная информация о типе и механизмах излучения может быть получена из морфологии, спектра и поляризационных характеристик радиоисточника, но только с

помощью оптических данных оценивается расстояние и уверенно классифицируется объект. Стандартный способ отождествления в каталогах основан на координатном совпадении положения объектов в поисковой области заданного радиуса. И отождествлением считается ближайший по расстоянию источник. Такой алгоритм называется поиском ближайшего соседа. При кросс-идентификации оптических каталогов этот метод дает высокий процент отождествлений, но сравнение оптического и радио каталога является более сложной задачей.

Обычно радиоисточники отождествляются с достаточно слабыми объектами в оптике. При предельной глубине оптического обзора неба (Паломарского) ~20 зв.вел. отождествляется около 20% радиоисточников. Чем слабее по плотности потока в радиодиапазоне источники, тем более глубокие снимки необходимы для обнаружения оптического объекта, ответственного за радиоизлучение. Оптический обзор SDSS имеет предел в фильтре  $r=22.6$  зв.вел., что по оценкам позволяет отождествить 50%-60% радиоисточников, причем информация об объектах имеется в 5 фотометрических полосах от голубого до близкого инфракрасного диапазона. Фотометрическую информацию в 5 фильтрах можно использовать для оценки красного смещения и космологического расстояния объекта.

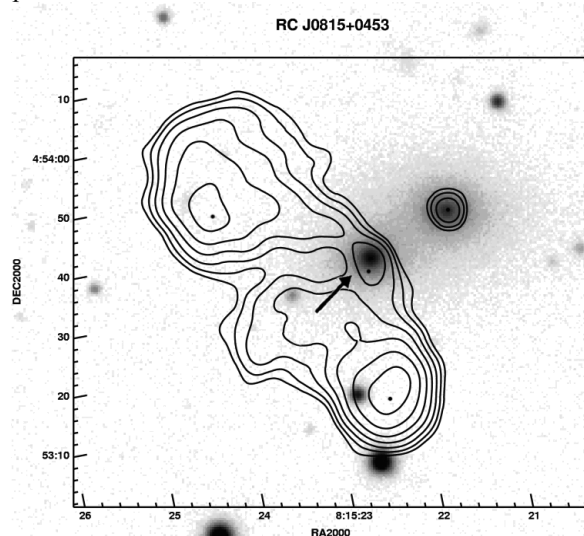


Рис. 1. Радиоисточник RC J0815+0453. Контур радиоизображения из обзора FIRST наложены на снимок из обзора SDSS ( $r$  фильтр). Жирными точками обозначены объекты из каталога FIRST. Оптическое отождествление обозначено стрелкой.

Низкое угловое разрешение обзоров в радиодиапазоне до появления радиообзоров NVSS и FIRST не позволяло выполнять массовое оптическое отождествление радиокаталогов. Сложно создать надежный алгоритм для определения положения оптического кандидата для многокомпонентного радиоисточника (см рис.1). Многие радиоисточники являются протяженными с размерами от нескольких угловых секунд до десятков минут, и их отождествление при высокой поверхностной

плотности оптических объектов часто затруднено из-за того, что в область поиска попадает несколько объектов, и для выбора требуется дополнительная

Первая попытка учесть многокомпонентную природу радиоисточников в процедуре кросс-идентификации была предпринята в работе Magliocchetti et al. (1998), которые использовали алгоритм «схлопывания» для радиоисточников FIRST обзора. Они рассматривали пары источников с расстоянием  $3'$  и объединяли в один, если расстояние между источниками пары было меньше расстояния, определенного из эмпирической зависимости от плотности потока. Этот простой метод хорошо работает для двойных радиоисточников (double-lobe).

В статье McMahon et al. (2002) при кросс-идентификации FIRST с оптическим обзором APM рассматривается подход для отождествления изолированных двойных радиоисточников, которые можно отнести к простому случаю многокомпонентных источников. Так в этой работе объект считается одиночным, если в области радиусом  $60''$  нет еще радиоисточников, иначе его относят к группе объектов. Для источников со структурой ядро-выброс (core-jet) компоненты сильно различаются по потокам, и оптический кандидат отождествляется с более ярким неразрешенным в радио компонентом. Для двойных радиоисточников (double-lobe) оптический кандидат расположен между компонентами, если они имеют сравнимые потоки и схожие размеры. Если радиокомпоненты отличаются по плотности потока, то оптический кандидат расположен на линии, соединяющей максимумы интенсивности, ближе к более яркому компоненту (в центре тяжести).

При оптическом отождествлении FIRST с оптическим обзором SDSS (Ivezic et al., 2002) для однокомпонентных источников использовалась поисковая область радиусом  $1.5''$ , центрированная на положение объекта SDSS. Авторы показали, что по сравнению со случайным распределением для изолированных источников FIRST имеется избыток ближайших соседей, расстояние между которыми меньше, чем  $1'$ . Источники, у которых не было обнаружено оптического кандидата при первом проходе, использовались для поиска многокомпонентных радиоисточников. В этом случае рассматривались пары с расстоянием  $< 90''$ . Для отождествления радиоисточника со структурой ядро-компоненты (core-lobe) или двойного (double-lobe) использовали точку, расположенную по середине между парой ближайших соседей. В результате кросс-идентификации по такому алгоритму оказалось, что 90% отождествленных радиоисточников FIRST - однокомпонентные и 10% - многокомпонентные.

Для радиокаталогов с недостаточной для оптического отождествления координатной точностью ( $\sim 1$ угл.мин.) и невысоким угловым разрешением обычный алгоритм кросс-идентификации не дает надежного результата. Перед оптическим отождествлением необходимо уточнение координат источников (до  $\sim 1$ угл.сек.) по

более точному радиокаталогу. При кросс-идентификации радиокаталогов, кроме координатного совпадения, надо учитывать угловое разрешение, чувствительность, частоту, а также радиоспектр объектов. Эту процедуру необходимо выполнять в три этапа: сначала координатное совпадение с учетом углового разрешения, размеров и ориентации источника, затем проверка потока на одинаковых частотах и, окончательно, проверка зависимости на разных частотах, исходя из полученного спектра.

Выбор оптического кандидата зависит от информации о структуре радиоисточника. Чем выше угловое разрешение радиоизображения, тем надежнее оптическое отождествление.

### 3. Исследование радиоисточников каталога RC

В 1980-1985гг на радиотелескопе PATAH-600 был проведен многочастотный глубокий обзор полосы неба шириной  $20'$ , центрированной на склонении источника SS433 (Decl<sub>1950.0</sub>= $+4^{\circ}54'$ ). Угловое разрешение обзора составило  $\sim 1'$  на частоте 3.9ГГц или  $\lambda=7.6$ см (Берлин и др., 1981). Число объектов в каталоге RC составляет 1165 (Pariiskij et al., 1991; Bursov, 1996). Сначала оптическое отождествление источников каталога было проведено по фотографическому Паломарскому обзору (Соболева и др., 1994; Флетчер и др., 1996). Радиокоординаты уточнялись по каталогу TXS (Douglas et al., 1996). Общее число источников составило 266 и для 72 ( $\sim 27\%$ ) были обнаружены оптические кандидаты. Далее оптические отождествления выполнялись для источников с крутыми спектрами. В эту выборку вошли источники каталога RC со спектральным индексом  $\alpha > 0.9$ . Она использовалась для поиска далеких радиогалактик по программе «Большое Трио», в которой наблюдательные данные для исследований были получены на трех крупнейших телескопах: PATAH-600 и БТА (САО РАН), VLA (NRAO, USA). Выборка включает 104 двойных радиоисточника. Для отождествления использовались радиокарты с высоким угловым разрешением, полученные на VLA, поскольку детальная информация о структуре радиоисточника является определяющей при выборе оптического кандидата, В итоге для 329 источников каталога RC уточнены координаты, в основном по каталогу TXS. 225 источников каталога RC отождествлены по фотографиям POSS и ПЗС-сняткам, полученным на БТА (Парийский и др. 1996). Результаты отождествления еще 50 источников SS выборки каталога RC опубликованы в работе Верховданова и др. (2002). Для  $\sim 20\%$  от общего числа источников каталога выполнено отождествление в оптике.

С появлением новых обзоров в радио и оптическом диапазоне появилась возможность получить дополнительную информацию о радиоисточниках. Изучаемая выборка определялась из области пересечения каталога RC с обзорами FIRST и SDSS. Общая площадь ее составила  $\sim 120$

кв.угл. градусов. Для изучения свойств источников каталога RC были выбраны радиокаталоги в диапазоне от 74МГц до 4.85ГГц. Приведем характеристики FIRST, NVSS, TXS, VLSS и GB6. Обзор FIRST имеет чувствительность ~1мЯн и угловое разрешение 5" на частоте 1.4ГГц при размере пикселя изображения 1.8". Астрометрическая привязка изображений выполнена с точностью 0.5". По этим параметрам обзор был выбран в качестве опорного для оптического отождествления источников каталога RC. NVSS – обзор на частоте 1.4ГГц с пороговой плотностью потока 2.5мЯн. Ошибки координат, как по прямому восхождению, так и по склонению варьируются в пределах ~1" для источников ярче 15 мЯн. Угловое разрешение NVSS - 45". С таким угловым разрешением потоки источников определяются надежнее, чем в FIRST. Каталог TXS – радиообзор на частоте 365МГц с предельной плотностью потока 250мЯн и позиционной точностью ~1" по обеим координатам. VLSS (Cohen et al., 2006) имеет угловое разрешение 80" на частоте 74МГц и предельную чувствительность ~500мЯн. GB6 (Gregory et al., 1996) – радиообзор, выполненный с разрешением 3.5' на 6 см (4.85ГГц), содержит более 75000 дискретных источников с плотностью потока >18мЯн. Версии каталогов FIRST, NVSS, VLSS, TXS, GB6 взяты из Vizier.

Радиотелескоп PATAH-600 имеет секторную диаграмму направленности, и его угловое разрешение по склонению в ~3 раза хуже, чем по прямому восхождению (Майорова и Трушкин, 2003), а имеющиеся web-сервисы используют одинаковый радиус поиска по обеим координатам. В более сложном алгоритме пакета SPECFIND, учитывающем при кросс-идентификации угловое разрешение каталога, размеры и спектральные особенности радиоисточников, полагается, что диаграмма радиотелескопа карандашная, с равным разрешением по обеим координатам. Алгоритмы автоматической кросс-идентификации выдают низкий процент совпадений для каталога RC, поэтому отождествление выборки источников, попавших в область, совпадающую с SDSS и FIRST, проводилось визуально, по предварительно подготовленному материалу.

Автоматическая подготовка данных для отождествления выборки каталога RC и визуализация результатов выполнялась программными средствами IVOA: интерактивным атласом неба Aladin (, Vizier (Ochsenbein F., Bauer P., Marcout J., 2000) и TOPCAT (Taylor M., 2005). Кросс-идентификация с каталогами выполнялась в два этапа. Сначала источники каталога RC были отождествлены с NVSS, который был выбран в качестве координатного опорного каталога, затем для оптического отождествления использовались координаты FIRST, обзора с более высоким угловым разрешением, позволяющим определить детальную структуру радиоисточников.

Для подготовки данных из перечисленных каталогов, а также изображений из обзоров NVSS,

FIRST и DSS использовался программный интерфейс Aladin для Perl. Изображения из обзоров FIRST, NVSS и DSS-II извлекались с помощью интерактивного атласа из архивов NRAO и STScI (Space Telescope Science Institute). Для идентификации радиоисточника каталога RC с объектами каталогов просматривался предварительно подготовленный стек Aladin с результатами запросов к выбранным обзорам и каталогам. Для отображения расположения относительно друг друга источников из обзоров NVSS и FIRST строились контуры радиоизображений и отмечались объекты каталогов. Инструментарием Aladin измерялось расстояние от источника RC до объекта опорного каталога (NVSS или FIRST). Сопоставление изображений обзора FIRST (угловое разрешение 5") с NVSS (угловое разрешение 45"), еще раз подтверждает, что надежное оптическое отождествление возможно только по радиокартам с высоким угловым разрешением, особенно, когда источник NVSS не является точечным и распадается на изображениях FIRST на несколько компонент или отдельные источники. Прорисовка контуров в Aladin достаточно грубая, что мешает выбрать правильное отождествление в случае многокомпонентных источников или наличия нескольких оптических кандидатов. Для уточнения структуры радиоисточника по изображениям обзора FIRST дополнительно использовался сервис ([http://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/FIRST/postage\\_first\\_contour\\_newed.html](http://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/FIRST/postage_first_contour_newed.html)), который при построении контуров не искажает угловое разрешение обзора.

Чтобы точнее описать идентификацию источника каталога RC в разных ситуациях, проведена индексация отождествления по следующим категориям:

- «а» - надежное отождествление. Источник расположен изолированно, положение по каталогу RC совпадает с FIRST, NVSS. Плотности потока согласованы;
- «b» - вероятное отождествление (>67%). Источник расположен по склонению дальше, чем  $3\sigma$ , или значение потока не согласовывается с табличными значениями NVSS, GB6.
- «с» - возможное отождествление (~50%). Источник отклоняется по прямому восхождению больше, чем  $3\sigma$ . Плотности потока не согласуются с NVSS, GB6.
- «d» - маловероятное(<30%). Имеется два варианта отождествления;
- «е» - нет отождествления с объектами других каталогов.

В статистике рассматриваются категории «а», «b», «с». Категории «d» и «е» не учитываются. Для рассмотрения последних двух случаев нужна дополнительная информация, которой мы на текущий момент не располагаем.

Идентификация источника каталога RC зависит от нескольких факторов:

- 1) координатное совпадение по прямому восхождению. В этом случае расстояние

между положением RC и положением FIRST или  $NVSS < 3\sigma$ ;

- 2) координатное совпадение по склонению - расстояние между положением RC и положением FIRST или  $NVSS < 3\sigma$ ;
- 3) соотношение величины плотности потока. Объект NVSS или FIRST имеет поток несколько мЯн, и, вероятно, слабее пороговой чувствительности каталога RC. Источник каталога RC имеет не согласующийся поток с NVSS, GB6;
- 4) наличие в окрестности конкурентов. Рядом с объектом каталога RC расположено один, два или несколько объектов. Яркие объекты, расположенные дальше от источника, чем размер диаграммы направленности PATAH-600, могут повлиять на координатные измерения и внести искажения в величину потока. Группа слабых объектов, попавшая в диаграмму, может повлиять сходным образом.

Для принятия решения в сложных случаях использовался атлас, отображающий область каталога RC с разметкой координатных ошибок источников каталога, нанесенными положениями и потоками радиоисточников из NVSS, VLSS, TXS, GB6, PMN и др.

Для последующего оптического отождествления определялась структура радиоисточника по изображениям обзора FIRST с помощью сервиса ([http://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/FIRST/postage\\_first\\_contour\\_newed.html](http://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/FIRST/postage_first_contour_newed.html)). Радиокарты для источников выборки находятся по адресу <http://www.sao.ru/hq/zhe/RC/>. Для разделения на типы по структуре радиоисточника использовалась классификация из работы McMahon et al. (2001), в которой учитывается положение оптического кандидата:

- C (core) – точечный источник. Оптический кандидат по координатам совпадает с максимумом интенсивности радиоизлучения.
- CJ (core-jet), CL (core-lobe) - Основная часть радиоизлучения сосредоточена в ядре. Оптический кандидат совпадает с ядром.
- D (double-lobe) – двойной. Яркость в компонентах растет к краям. Оптический кандидат располагается между компонентами, в области возникновения джетов.
- DC (double-core) – двойной с ядром. Ядро слабое, яркость в компонентах растет к краям, оптический кандидат совпадает с ядром. Дополнительный квалификатор, который используется в классификациях – asymmetric (A), обозначающий ассиметричную структуру.
- T (triple) - источник с ядром и двумя компонентами. Ядро похоже на точечный радиоисточник. Излучение ядра сравнимо с излучением компонент. Оптический

кандидат совпадает с ядром.

В итоге идентификации выборки с радиокаталогами получилось, что ~57% источников имеют индекс «a», 8% - «b», 8% - «c», 10% - «d», 17% - «e». Дальнейшая статистика приводится для источников, попавших в группы «a», «b», «c», или ~73% выборки.

Для каждого идентифицированного источника визуально по радиокартам была определена морфологическая структура, а в некоторых случаях - разделение на отдельные объекты. Это позволило по составным изображениям NVSS и FIRST и отмеченным каталожным положениям FIRST определить число компонентов. К однокомпонентным источникам мы отнесли объекты с одним входом в каталоге FIRST. Не всегда однокомпонентные источники имеют ядерную или точечную C (core) структуру. Статистика получилась следующая: однокомпонентные - ~58%, двухкомпонентные - ~26%, трехкомпонентные - 10%, четыре и более - 6%. Этот результат не совпадает с приведенным в статье Ivezić et al. (2002), где указывается, что при автоматической кросс-идентификации FIRST с SDSS более 90% радиоисточников имеют ядерную структуру, и ~10% - многокомпонентную. В работе McMahon et al. (2002) число двойных источников FIRST оценивается ~8%, тройных ~3%, групп из 4-х компонентов и более ~1%. Наша выборка небольшая по числу источников в сравнении с приведенными в этих работах, но отличающийся результат может указывать на то, что для алгоритмов, позволяющих более надежно собирать отдельные компоненты в источник, нужно использовать еще дополнительные параметры, кроме расстояния между компонентами.

По морфологической структуре источники разделились следующим образом: C – 43%; CL, CJ – 11%; T – 7%; D – 32%; DC – 6%. Среднее значение угловых размеров радиоисточников (LAS) типа C составляет ~1.96"; T ~9.58"; CL, CJ ~33.8"; D ~20.8"; DC ~72.5".

По уточненным координатам для 73% радиоисточников выборки выполнено оптическое отождествление с обзором SDSS. Оказывается, что для ядерных источников (C) у 24% не обнаружен оптический кандидат, соответственно у CJ - 25%. Они отождествляются хуже, чем CL(4%) и D(14%).

### 3. Уточнение потока работ для исследования списка радиоисточников

Задачу автоматического отождествления выборки каталога RC в области, пересекающейся с обзорами SDSS и FIRST, разделили на две фазы: подготовка данных и визуализация результатов для последующего принятия решения об отождествлении радиоисточника с оптическим кандидатом (Kalinichenko et al., 2006).

Поток задач для фазы подготовки выглядит следующим образом:

- 1) запрос каталога RC;

- 2) запрос каталога SDSS DR3;
- 3) кросс-матчинг результатов запросов с использованием селекционного ограничения по показателю цвета;
- 4) извлечение и суперпозиция изображений.

Чтобы можно было в системе AstroGrid работать с каталогом RC, его поместили в систему управления базами данных PostgreSQL и оформили как компонент DSA AstroGrid.

Визуализация данных, оформленная в виде потока задач, производилась средствами ALADIN. Для каждого объекта из таблицы, полученной после кросс-матчинга, используя его координаты в качестве центра области, извлекались оптические изображения из DSS. Контуры радиоизображения из FIRST совмещаются с областью DSS. Затем извлекаются объекты из каталогов SDSS, 2MASS, FIRST, NVSS, попавшие в область поиска. Выполняющая эти запросы программа, написанная на языке команд Aladin, показана ниже. Переменная address содержит координаты в формате "RaH:RaM:RaS DecH:DecM:DecS":

```
"reset; grid;"
"get DSS.ESO(DSS1,14.1,14.1) " + adress + " 5';
sync;"
"get NVSS(0.2,15.0,Stokes I,Sine) " + adress + "
5';"
"sync; contour 4;"
"get FIRST(10) " + adress + " 5';"
"sync; contour 4;"
"get SDSSDR3cat " + adress + " 1';"
"sync;"
"get Vizier(2mass) " + adress + " 1';"
"sync;"
"show 1; hide NVSS FIRST;"
"backup st.aj"
```

Функциональные возможности ALADIN по управлению потоком работ ограничены и позволяют производить простую последовательность без ветвлений и циклов. По выполнению программы данные запоминаются в стеке Aladin и сохраняются в MySpace (область виртуальной разделяемой памяти в системе AstroGrid), а затем после визуального просмотра принимается решение о выборе оптического кандидата.

Один из ключевых моментов в сценарии отождествления списка радиоисточников с помощью средств AstroGrid является web-сервис, выполняющий кросс-идентификацию радиокаталогов. В демонстрационном примере, используя сервис, имеющийся в AstroGrid, мы сразу полагаем, что координатной информации в списке радиоисточников достаточно для надежного отождествления, а ограничение по показателю цвета поможет нам отбросить лишние объекты, попавшие при кросс-матчинге в область. Процент совпадений при этом получился невысокий. Чтобы отождествить оставшиеся радиоисточники, нам надо более детально разобраться в кросс-матчинге каталогов.

Для радиокаталогов с недостаточной для оптического отождествления координатной точностью (~1') и невысоким угловым разрешением обычный алгоритм кросс-матчинга (поиск

ближайшего соседа) не дает надежного результата. Перед процедурой оптического отождествления необходимо уточнить координат источников по более точному каталогу, выбранному в качестве опорного. При кросс-идентификации радиокаталогов, кроме координатного совпадения, надо использовать в алгоритме угловое разрешение, размеры и ориентацию источника, а также учитывать предельную чувствительность каталога по плотности потока и спектральную информацию. Алгоритм кросс-идентификации программного пакета SPECIFY (Vollmer B. et al., 2005) использует это. Процедура в SPECIFY выполняется в три этапа: сначала координатное совпадение, затем проверка потока на одинаковых частотах и, окончательно, проверка зависимости на разных частотах, исходя из полученного спектра.

Поисковая область в имеющихся web-сервисах задается обычно одним параметром (радиусом области) для всего набора данных. В пакете SPECIFY угловое разрешение каталога также задается одним числом, что не совсем подходит для радиотелескопов с секторной диаграммой направленности, как у PATAH-600. Лучший результат кросс-матчинга из-за разного размера диаграммы PATAH-600 по прямому восхождению и склонению получался бы для объектов каталога RC, если бы область поиска задавалась двумя параметрами и имела форму эллипса. Еще в алгоритме SPECIFY предполагается, что ошибки определения координат объектов составляют небольшую часть от размеров диаграммы направленности, и они не учитываются в алгоритме. Для каталога RC это условие не выполняется, и учет ошибок индивидуально для каждого объекта необходим. Перечисленные причины дали низкий процент совпадений для каталога RC при использовании SPECIFY. Для кросс-идентификации радиокаталогов с невысокой координатной точностью, в частности каталога RC, необходимо модифицировать этот алгоритм.

Уже с уточненными координатами можно приступить к оптическому отождествлению. Но нужно учитывать, что пиковое значение плотности потока радиоисточника не всегда совпадает с родительской галактикой. Поэтому знание морфологической структуры радиоисточника необходимо для надежного оптического отождествления.

По исследованиям выборки каталога RC оказалось, что для ~60% идентифицированных источников выборки являются однокомпонентными в каталоге FIRST, остальные - сложные по структуре радиоисточники, представленные несколькими каталожными объектами. По данным из литературы доля многокомпонентных источников FIRST оценивается от ~30% (Croft et al., 2001) до 10% (Ivezic et al., 2000). Поскольку оптическое отождествление базируется на каталоге FIRST, то для массового отождествления нужно учитывать многокомпонентную структуру радиоисточников. Задача разделяется на две - изучение одиночных однокомпонентных объектов и изучение многокомпонентных объектов.

Для оптического отождествления однокомпонентных источников при кросс-матчинге FIRST и SDSS выбираем следующие параметры: источник FIRST не имеет соседей в радиусе  $1''$  (Губанов и др., 2003) и в области радиусом  $1.5''$ , центрированной на положение радиоисточника, производится поиск оптического объекта (Ivezic et al., 2000). В итоге получаем два списка изолированных одиночных радиоисточников: первый – радиоисточники, отождествившиеся с оптическими объектами, второй – радиоисточники без отождествления. Неотождествленные с SDSS радиоисточники представляют дополнительный интерес, поскольку более далекие объекты слабее в оптике.

Большая часть многокомпонентных источников являются двойными. По нашей выборке они составляют ~26% от общего числа объектов FIRST, которые отождествились с источниками каталога RC. Дополнительная операция, которую необходимо выполнять для двойных радиоисточников, состоит в группировке подходящих компонентов FIRST в один источник. Протяженные радиоисточники, в большинстве случаев, вытянуты вдоль некоторой оси, расстояние между компонентами и родительской галактикой коррелирует с их потоками, а ориентация компонентов следует направлению большой оси источника. Каталог FIRST содержит параметры о структуре своих объектов, которую можно использовать для процедуры объединения компонентов в один источник. В работе Губанова и др. (2003) описывается разработанный авторами алгоритм объединения компонентов по угловому расстоянию между объектами, их взаимной ориентации (соосности) и угловым размерам вдоль большой оси объекта. Предполагается, что два объекта каталога FIRST принадлежат одному и тому же источнику, если они находятся на расстоянии меньшем, чем радиус объединения, который определяется по размерам объектов и углу взаимной ориентации.

Для оптического отождествления списка двойных радиоисточников предварительно рассчитывается положение оптического кандидата в центре тяжести по плотности потока компонентов. Далее процедура изучения этой части списка проводится по схеме для точечных источников.

Дальнейший сбор данных связан с идентификацией с источниками других радиокаталогов. Чтобы изучить спектральные свойства радиоисточников, необходима информация, как из низкочастотных, так и высокочастотных обзоров. Крутизна радиоспектра источника – эффективный критерий селекции кандидатов в далекие радиогалактики. Определение спектрального индекса источников в поисковых списках производится по данным двух каталогов, например, TXS (365МГц) и NVSS (1.4ГГц). Появление обзоров на других частотах, так, например, VLSS – 74МГц и GB6 – 4.85ГГц, дает дополнительные сведения о форме спектра объектов в радиодиапазоне. Двухчастотные спектральные индексы можно использовать для разделения источников на группы, различающиеся

по форме спектра. Распределение двухчастотных спектральных индексов известных радиогалактик с красным смещением  $z > 4$  отличается от выборки каталога RC, что позволяет определить ограничивающие условия по двухчастотным индексам и выделить источники еще и по форме спектра, уточнив обычно используемый критерий селекции по одному спектральному индексу.

Проведенное исследование выборки каталога RC в области пересечения с обзорами FIRST и SDSS выполнено с помощью программных средств IVOA – интерактивного атласа неба ALADIN и TOPCAT. Полученные результаты позволили определить этапы и формализовать сценарий отождествления списка радиоисточников, выявить недостатки имеющихся сервисов и выбрать алгоритмы кросс-идентификации и объединения компонентов в радиоисточники для каталога FIRST.

Надеемся при дальнейшем изучении выборки и сопоставлении уже имеющихся данных обнаружить эмпирические закономерности, которыми можно будет воспользоваться при статистических исследованиях радиоисточников и в алгоритмах кросс-идентификации радиокаталогов.

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

## Литература

- [1] Quinn, P. J. et al., SPIE Proc., v. 5493, 137-145 (2004)
- [2] Walton, N. A.; Gonzalez-Solarez, E.; Dalla, S.; Richards, A.; Tedds, J. Astronomy & Geophysics, v. 47, 3.22-3.24 (2006)
- [3] Condon J.J., Cotton W.D., Greisen E.W., Yin Q.F., Perley R.A., Taylor G.B., Broderick J.J. Astron. J. 115, 1693 (1998)
- [4] Becker R.H., Helfand D.J., White R.L., Gregg M.D., Laurent-Muehleisen S.A., Astrophys. J. 475, 479 (1997)
- [5] Abazajian, K. et al. AJ, 129, 1755 (2005)
- [6] Briukhov D.O., et al., Information Infrastructure of the Russian Virtual Observatory (RVO). Second Edition IPI RAN, 2005, 173c
- [7] Берлин А.Б. и др., 1981, ПАЖ, т.7, 290
- [8] Zhelenkova, O.; Vitkovskij, V. V.; Briukhov, D.; Kalinichenko, L. A., ADASS XV ASP Conference Series, v. 351, p.244 (2006)
- [9] Kalinichenko L.A., Stupnikov S., Vovchenko A., Zakharov V.N., Zhelenkova O.P. Proc. RCDL VIII, 2006, 120-129 (2006)
- [10] Magliocchetti, M. et al., MNRAS, 300, 257 (1998)
- [11] McMahon, R. G et al., ApJS, 143, 1 (2002)
- [12] Ivezic, Z. et al., AJ, 124, 2364 (2002)
- [13] Берлин А.Б. и др., ПАЖ, 7, 290 (1981)
- [14] Pariiskij, Yu. N. et al., A&AS, 87, 1(1991)
- [15] Бурсов Н.Н., АЖ, 73, 1 (1996)
- [16] Verkhodanov, O. V et al., ESO ASTROPHYSICS SYMP., 316 (2004)
- [17] Соболева Н.С., Парийский Ю.Н., Наугольная М.Н., АЖ, 71, 684 (1994)
- [18] Fletcher, A. et al., Astronomy Reports, 40, 759

- (1996)
- [19] Копылов А.И. и др., АЖ, 72, 437 (1995)
  - [20] Parijskij Yu. N., et al., Bulletin SAO, 40, 5(1996)
  - [21] Verkhodanov O.V et al., Bulletin SAO, 52, 3 (2001)
  - [22] Майорова Е.К., Трушкин С.А. Бюлл.САО, 54, 89 (2002)
  - [23] Ochsenbein F., Bauer P., Marcout J., A&AS 143, 221 (2000)
  - [24] Ochsenbein, F et al., ADASS XIV ASP Conf. Series, 347, 193 (2005)
  - [25] Taylor, M. B. ADASS XIV ASP Conf. Series, 347, 29 (2005)
  - [26] Becker R.H., et al., ApJ. 475, 479 (1997)
  - [27] Douglas J.N., et al., AJ. 111, 1945(1996)
  - [28] Cohen, A. S et al., Astronomische Nachrichten, 327, 262 (2006)
  - [29] Gregory, P. C et al., ApJS, 103, 427 (1996)
  - [30] Vollmer B. et al., 2005, A&A, 431, 1177-1187
  - [31] Croft et al., astro-ph/0110119, 2001
  - [32] Ivezić et al., AJ, v.124, 2364-2400, 2000
  - [33] Губанов и др., ПАЖ, 29, 264-276, 2003

## **Application of IVOA software tools for radio sources investigation.**

Zhelenskova O.P., Kopylov A.I., Chernenkov V.N.

The interrelationship between the objects of astronomical catalogs in the different ranges of electromagnetic spectrum and their association into the real astrophysical source has obvious scientific interest. Astronomical community actively uses the Internet for the access to the scientific information, but the heterogeneity of data and their constantly growing volumes are the certain difficulty. The gathering of information even about one celestial object is time-taking work because of a large quantity of resources, data access, formats of the obtained results and formats of input data of the program applications, used for further analysis. The community activity on the creation of the architecture of information interaction, standards, format specifications, data models and services, which increase the efficiency of work with the data, coordinates International Virtual Observatory Alliance (IVOA). Within the framework of this activity are created systems, which make it possible to realize the distributed computing and data access. We decided to analyze the usage of existing software tools for investigation the radio sources list.