

Лабораторная работа 2.

Селекция кандидатов в далекие радиогалактики *

О. В. Верходанов^{a†}

^a *Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Карачаево-Черкесия, Россия*

Аннотация

Целями данного практикума являются ознакомление с процессом селекции далеких радиогалактик, методикой построения континуальных радиоспектров и оптического отождествления радиоисточников с объектами цифровых обзоров неба. Студент должен отобрать кандидаты в далекие радиогалактики, используя их свойства в различных диапазонах волн, и составить свой каталог. В результате выполнения задания отрабатываются навыки работы с современными базами данных и системами обработки данных.

Задача:

1. Построить свою выборку объектов - кандидатов в далекие радиогалактики. Желательно, чтобы выборка содержала не менее 5-ти объектов, отождествляемых в оптическом диапазоне, и не менее 5-ти — неотожествляемых.
2. Дополнительный (необязательный) этап — оценить возраст отождествляемых радиогалактик.

Необходимые ресурсы: Интернет, базы данных CATS, DSS, SDSS, компьютер с ОС Linux.

Продолжительность работы: 2–4 дня.

Проверочные вопросы:

1. Что такое “крутой радиоспектр” радиоисточника ?
2. Какая классификация радиоисточников существует ?
3. С какими оптическими объектами отождествляются радиоисточники ?
4. Почему далекие радиогалактики могут помочь в поиске протоскоплений ?
5. Какие факторы уменьшают вероятность правильного отождествления радиоисточников с оптическими кандидатами ?

*Опубликовано: *О.В. Верходанов*. 2012. Селекция кандидатов в далекие радиогалактики. Лабораторная работа 2. В кн. “*Наблюдательная и теоретическая космология*”, Труды Летней школы Фонда Дмитрия Зимина «Династия» (7-ой Школы современной астрофизики, CAO РАН, Нижний Архыз, 2011) (М.:URSS, 2012), с.381-392.

[†]**e-mail:** vo@sao.ru

1 Описание работы

Предлагаемая лабораторная работа является небольшим исследованием, которое позволит изучить свойства радиоисточников в выбранном направлении на небе. Практикум является вспомогательной частью для Лекции 2 [1]. Задание включает в себя самостоятельное описание и примеры решения задачи в некоторой области неба.

Поиск далеких объектов, которые могут быть как галактиками, так и квазарами, — одна из важнейших задач наблюдательной астрофизики, так как помогает определить космологические параметры, связанные со временем появления и развитием звездных систем, крупномасштабной структурой Вселенной [2]. В связи с этим очень интересен поиск и составление наиболее полного каталога далеких радиогалактик. Как уже отмечалось в лекции [1], самые далекие объекты — галактики, не имеют регистрируемого радиоизлучения. В общем смысле радиогалактика — это галактика с радиоизлучением. Но, учитывая, что им обладают практически все галактики, мы будем говорить о радиогалактиках как об относительно сильных радиоисточниках на длине волны 21 см с плотностью потока $S > 10 \text{ мЯн}$, имеющих протяженную радиоструктуру и отождествляющихся с галактиками, причем, в основном, с эллиптическими. Радиогалактики в скоплениях отождествляются с гигантскими эллиптическими галактиками или сD-галактиками, являющимися самыми мощными радиоисточниками скоплений и образованными, по-видимому, за счет слияния спиральных галактик. Небольшая часть радиогалактик отождествляется с N-галактиками.

Поиск далеких радиогалактик ($z > 1$) особенно интересен тем, что с помощью них можно исследовать эпоху образования галактик в протоскоплениях (или скоплениях). Кроме того, обнаружение поглощения в $\text{Ly}\alpha$, создаваемого веществом, окружающим далекие радиогалактики, может помочь исследовать нейтральный газ на больших красных смещениях и проверить модели образования галактик.

Фонарев и Райли в 1974 г. [4] предложили в зависимости от структуры выделять 2 типа радиоисточников, которые сейчас обозначаются как FR I и FR II. Будем применять эту классификацию для радиогалактик. У первого типа радиогалактик радиояркость спадает

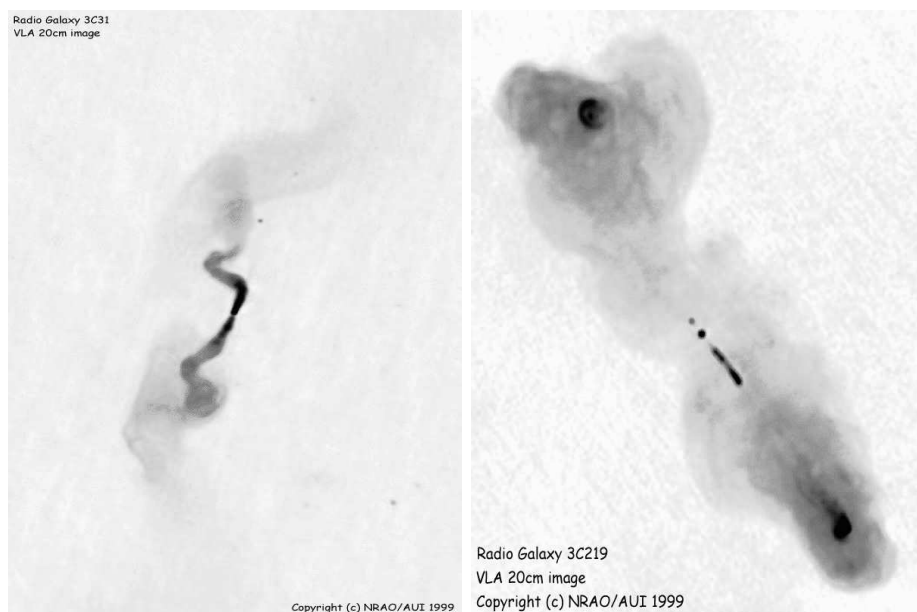


Рис. 1: Слева: изображение радиогалактики 3С 31, относящейся к классу FR I. Справа: изображение радиогалактики 3С 219, относящейся к классу FR II. Рисунки воспроизведены с сайта <http://www.cv.nrao.edu/~abridle/images.htm>.

к краям источника (Рис. 1), у второго типа — концентрируется преимущественно в боковых

компонентах, так называемых “горячих пятнах” (“hot spots”).

Структура радиоисточника сейчас определяется путем радиоинтерферометрических наблюдений (см. Лекцию 1 [3]), во время которых синтезируются карты объектов, доступные через Интернет. Таким образом, например, на VLA получены изображения обзора FIRST (Faint Image Radio Survey at Twenty cm) [5], данные которого будут использованы в настоящей работе.

Среди характеристик радиоисточников следует упомянуть его размер, спектральный индекс, плотность потока. Размер сложного источника можно определять как расстояние между наиболее удаленными компонентами в дуговых секундах. Спектральный индекс — это наклон касательной к кривой непрерывного радиоспектра источника на заданной частоте. В случае линейной аппроксимации это просто наклон прямой или коэффициент при переменном параметре. Спектр радиоисточника обычно аппроксимируется кривой (в логарифмическом масштабе) из следующего набора:

- $y = A + B * x$,
- $y = A + B * x + C * x^2$,
- $y = A + B * x + C * e^x$,
- $y = A + B * x + C * e^{-x}$,

где $y = \log_{10}(S)$, $x = \log_{10}(\nu)$, S — плотность потока в Янских (Ян), ν — частота в МГц. Плотность потока — это скорость выделения объектом энергии на единицу площади в единичной полосе частот, измеряемая в Ян (Ю) и в миллиЯнских (мЯн или мЮ) ¹. Таким образом, при линейной аппроксимации спектра радиоисточника спектральным индексом, обычно обозначаемым α , будет являться коэффициент B (см. выше первую кривую из набора), в любом другом случае это будет наклон касательной кривой спектра в данной точке (т.е. на данной частоте). В простейшем случае, когда для построения спектра используются две точки на различных частотах ν_1 и ν_2 с плотностью потока S_1 и S_2 , спектральный индекс вычисляется простым соотношением: $\alpha = \log_{10}(S_1/S_2)/\log_{10}(\nu_1/\nu_2)$.

Поиск далеких радиогалактик состоит из нескольких последовательных шагов (см., например, работы [6, 7, 8]):

1. отбор радиоисточников с крутыми спектрами (спектральный индекс $\alpha < -1$) преимущественно с плотностями потоков от 10 до 100 мЯн в сантиметровом диапазоне волн. При такой селекции учитываются два эффекта:
 - далекие объекты часто имеют крутые радиоспектры (установлено экспериментально),
 - среди источников из данного диапазона плотностей потоков велик процент далеких объектов.
2. Определение структуры радиоисточника с помощью радиоинтерферометрических данных, без которого невозможно провести классификацию объектов.
3. Отбор двойных радиоисточников (радиогалактик), имеющих структуру типа FR II.
4. Оптическое отождествление радиоисточников, получение многоцветной фотометрии и красного смещения.
5. Оценка возрастов с использованием различных эволюционных моделей звездного населения эллиптических галактик и измерение/оценка красных смещений отождествленных объектов.

¹ 1 Ян = 10^{-26} Вт м⁻² Гц⁻¹ = 10^{-23} эрг сек⁻¹ см² Гц⁻¹

Пункты 4) и 5), требующие соответствующих наблюдательных данных, приводятся здесь для получения общего представления о проводящихся исследованиях.

В данной практической работе по отбору кандидатов в далекие радиогалактики можно выделить следующие этапы:

1. Кросс-идентификация высоко- и низкочастотных каталогов, хранящихся в виде электронных таблиц в базе данных CATS² (astrophysical CATalogs Supporting system) [9]. Могут быть использованы такие каталоги как Техасский [10] (365 МГц), NVSS [11] и FIRST [5] (1400 МГц) и GB6 [12] (4850 МГц).
2. Отбор объектов с крутыми спектрами. После кросс-идентификации спектры исследуемых объектов в логарифмических масштабах аппроксимируются прямой, наклон которой и есть спектральный индекс.
3. Отбор объектов со сложной структурой по данным каталога FIRST и NVSS. Существенным здесь является именно каталог FIRST, который имеет разрешение 5" и позволяет выделять сложные и многокомпонентные структуры.
4. Оптическое отождествление отобранных источников с объектами каталога АРМ и оцифрованного Паломарского атласа DSS.
5. Расчет отношения правдоподобия отождествления.

Первый и второй этапы позволяют провести селекцию объектов с крутыми спектрами. Для этого предназначена база данных CATS: для первого этапа выполняется задача типа 'select', для второго — 'match'. По результатам выполнения второго этапа с окном отождествления радиусом 60" (по умолчанию) составляется список неточечных объектов, т.е. таких, у которых в окно поиска попадает несколько компонентов.

Для определения структуры радиоисточников на третьем этапе требуется копирование изображений (FITS-файлов) радиоисточников через Интернет. Для этого используется браузер FIRST обзора, имеющий адреса:

<http://sundog.stsci.edu/first/catalogs/readme.html>,

где дано описание данных, и

<http://third.ucllnl.org/cgi-bin/firstcutout>,

где строятся изображения радиоисточников в заданных координатах.

Из базы данных изображений необходимо отобрать именно те, которые имеют структуру типа FR II. Для селекции желательно использовать NVSS-координаты, определяемые интегрированием с большей диаграммой направленности, чем в FIRST обзоре. Координаты отобранных источников используются для отождествления и получения оптических изображений из оцифрованного обзора неба DSS, имеющего адрес:

http://stdatu.stsci.edu/dss/dss_form.html.

Полученные изображения можно обработать, например, в системе MIDAS и определить координаты и звездные величины. Кроме того, можно использовать каталог АРМ (Automated Measuring Machine), содержащий данные в виде списка выделенных объектов с измеренными координатами и звездными величинами, погрешности которых, к сожалению, не приводятся. АРМ система имеет, например, следующий адрес:

<http://www.aao.gov.au/local/www/apmcatbin> .

²<http://cats.sao.ru>

Если найдены оптические отождествления, то вероятность правильного отождествления (а именно, функция правдоподобия), зависящая от плотности фоновых объектов и ошибок определения координат, описывается следующей формулой [13]:

$$LR(r) = (1/(2 * \lambda)) * exp[0.5r^2 * (2\lambda - 1)],$$

где $\lambda = \pi * \sigma_{RA} * \sigma_{Dec} \rho$, ρ - плотность фоновых объектов, равная на высоких галактических широтах $5.16 \times 10^{-4} sec^{-2}$ $r = [(\Delta RA / \sigma_{RA})^2 + (\Delta Dec / \sigma_{Dec})^2]^{0.5}$, $\Delta RA, \Delta Dec$ - разности радио и оптических положений, σ_{RA}^2 и σ_{Dec}^2 - соответственно среднеквадратичные ошибки радио и оптических координат. Отождествление считается достоверным, если $LR > 2$. Если отождествление не найдено, то это значит, что искомый оптический объект слабее, чем обнаруживаемые на Паломарском Атласе, т.е. $R \geq 22^m$. Этот факт может также говорить в пользу того, что родительская галактика является далекой.

Как результат выполнения задания, должны быть представлены: 1) список отобранных объектов, включающий радио и оптические координаты, 2) плотности потока на низких и высоких частотах, 3) звездная величина или ее нижний предел, 4) спектральный индекс и 5) величина отношения правдоподобия, если имеется оптический кандидат на отождествление. Кроме того, надо показать файлы с таблицами объектов, картинки спектров и радиоизотоп FIRST-источников, наложенных на соответствующие DSS изображения.

2 Процедуры

Селекция радиоисточников по спектральному индексу упрощается, если выбирать объекты, начиная с низких частот. Например, пользуясь процедурой 'select' (Рис. 2), в меню для радиоисточников можно отметить каталог Texas и задать область на небе (Рис. 3).

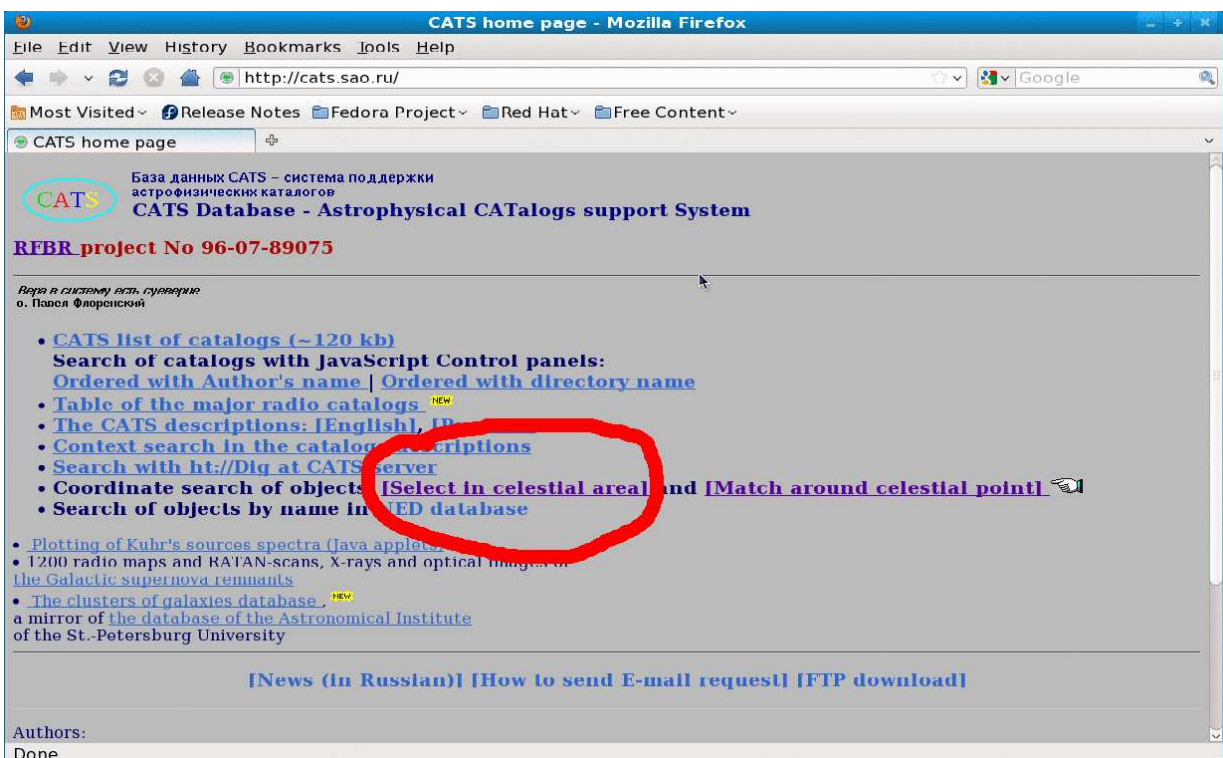


Рис. 2: Web-страница CATS с выбором процедуры 'select'.

По результатам выбора объектов в площадке CATS выдается список объектов, который можно с небольшими изменениями подать на ввод в процедуру кросс-идентификации.

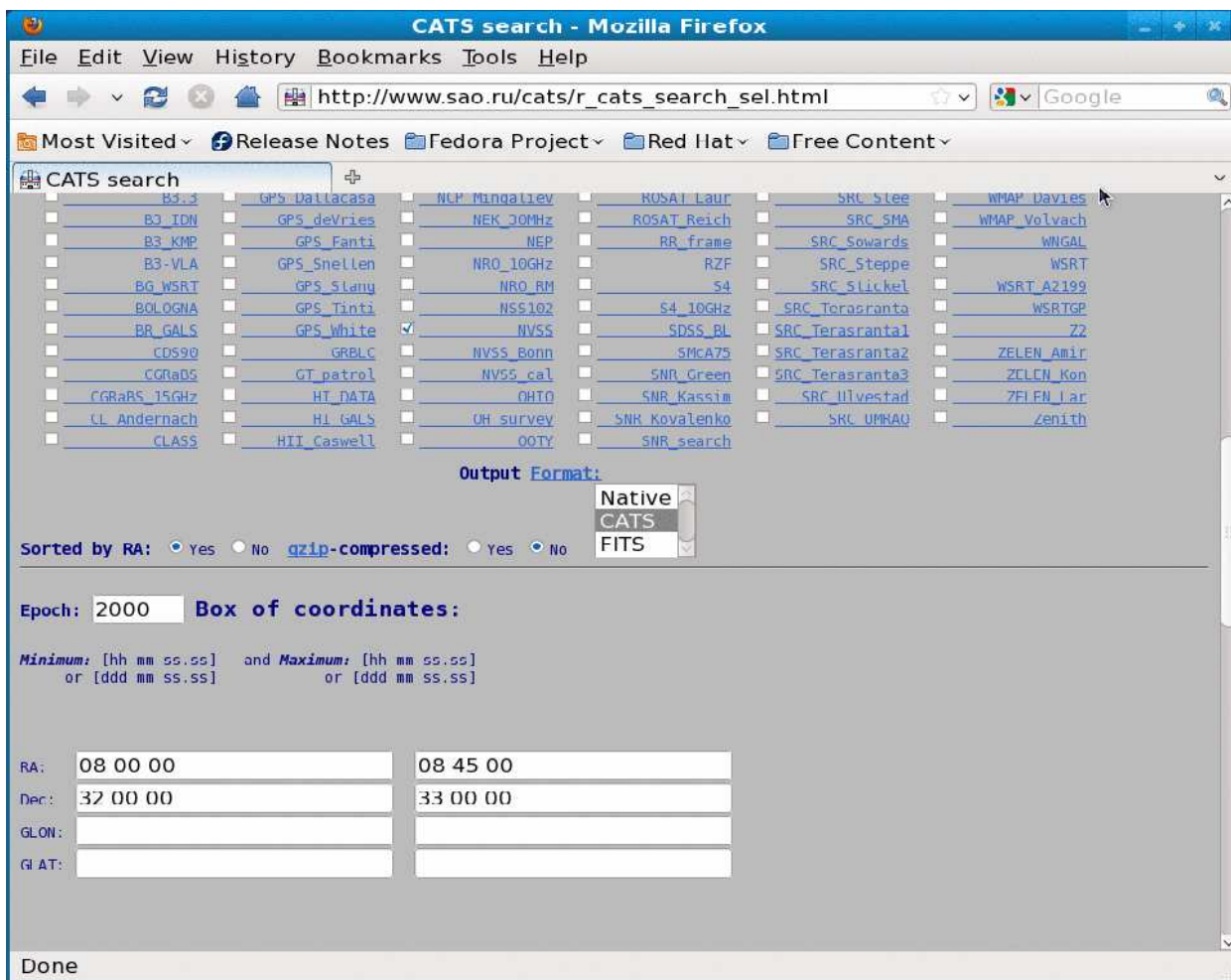


Рис. 3: Web-страница CATS процедуры *'select'*, демонстрирующая поля ввода координат площадки на небе.

Чтобы упростить задачу, здесь показан пример запуска команд Unix (*'grep'* и *'awk'*), преобразующих формат вывода *'select'* в формат ввода в поле задачи *'match'*:

```
grep -v \# init.list | awk '{
    printf "%s %s %s %s %s %s %s  \n", $2,$3,$4,$5, $7,$8,$9
}' > modified.list
```

Для задач кросс-идентификации (Рис. 4) можно использовать, по крайней мере, следующие каталоги:

- Texas (365 MHz, $S > 150 - 250$ мЯн);
- WENSS (325 MHz, $S > 18$ мЯн, $\delta > 30^\circ$);
- NVSS (1.4 GHz, $S > 2.3$ мЯн, $\theta = 45''$, $\delta > -40^\circ$);
- FIRST (1.4 GHz, $S > 1$ мЯн, $\theta = 5''$, $\delta > 28^\circ$);
- GB6 (4.85 GHz, $S > 18$ мЯн).

Спектр радиоисточника можно построить с помощью программы *'spg'* [14] системы анализа данных РАТАН-600 FADPS³ [15], которая позволяет считывать файл с результатами

³http://sed.sao.ru/~vo/fadps_e.html

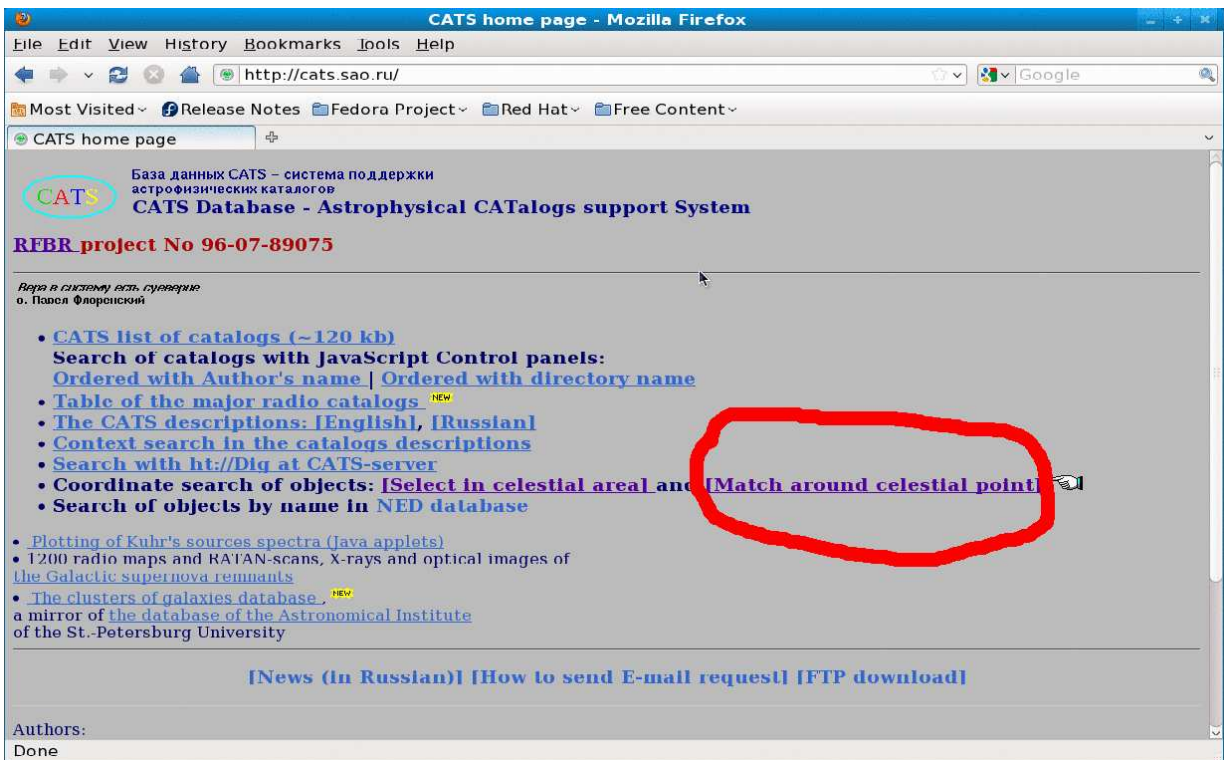


Рис. 4: Web-страница CATS с выбором процедуры 'match'.

кросс-идентификации в формате выдачи базы данных CATS. Интерактивная программа 'spg' запускается в таком виде:

```
spg -s -cats file.cats,
```

где *file.cats* – имя файла с результатом выборки данных в базе данных CATS. Описание программы можно найти, вызвав команду 'man spg'. По результатам расчета спектра программа 'spg' вычисляет также спектральный индекс. На Рис. 5 в качестве примера приводится спектр радиоисточника RC B1146+052.

Наложение радиоизофот на оптическое изображение можно провести несколькими способами. Например, использовать сайт SkyView⁴ и выполнить процедуру наложения on-line, выбрав требуемые оптические и радиокаталоги. Можно использовать программу SAOimage DS9 <http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/> для визуализации приложений, имеющую также возможность наложения изофот. Но можно вывести радиоизофоты на оптическое изображение с помощью программы 'skyview'⁵. Для этого после ее вызова необходимо набрать, по крайней мере, 3 команды:

```
skyview> pa optic.fts
skyview> grid
skyview> contourovl radio.fts 0.001 2
```

где первая команда выводит на экран изображение, записанное в FITS-файле *optic.fts* (с оптическими данными), вторая – наносит координатную сетку, третья – накладывает изофоты, построенные по радиоданным, содержащимся в файле *radio.fts*, начиная с уровня 0.001 Ян с шагом, пропорциональным 2. На Рис. 6 приводится результат наложения данных обзора FIRST на оптическое изображение радиоисточника GR 0910+48.

⁴<http://skyview.gsfc.nasa.gov>

⁵<http://www.ipac.caltech.edu/skyview/>

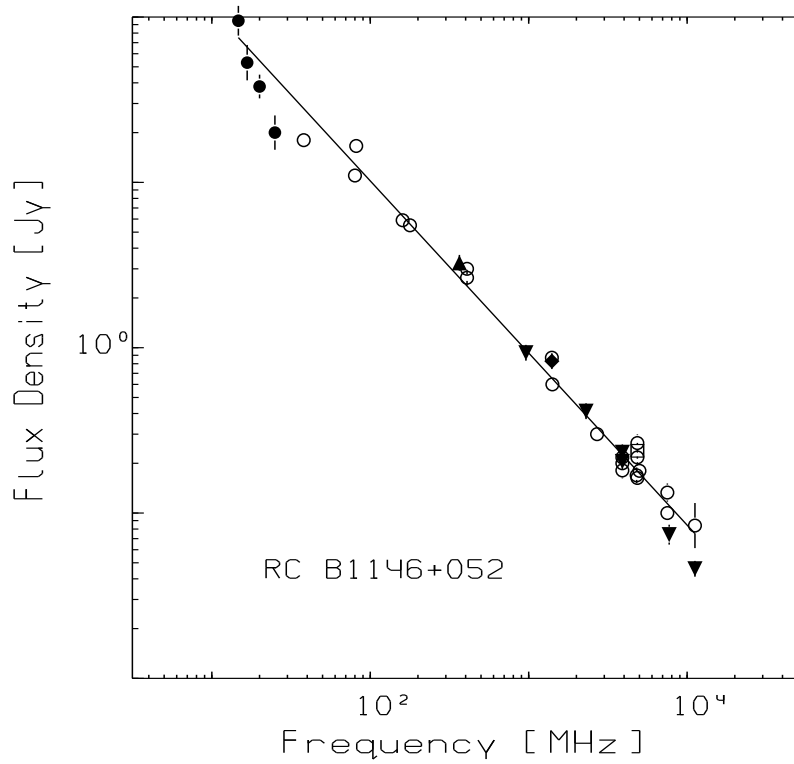


Рис. 5: Радиоспектр источника RC B1146+052

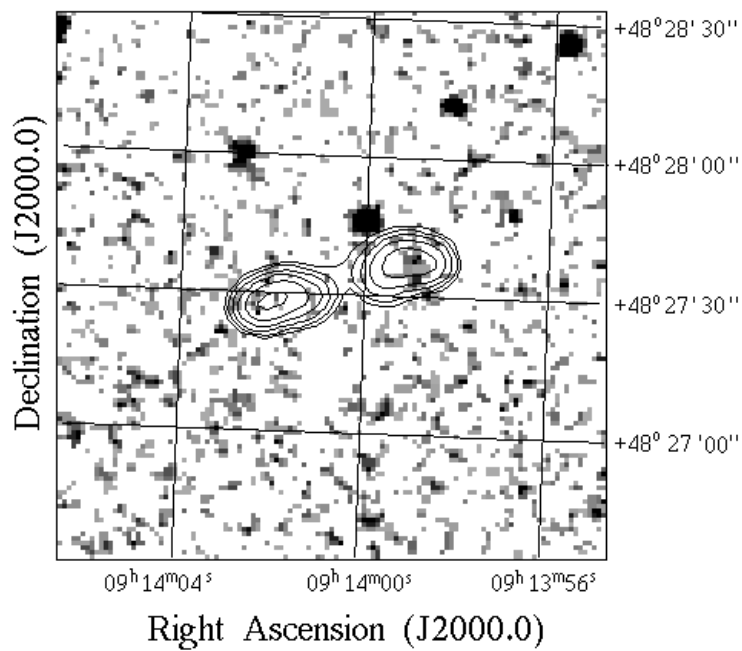


Рис. 6: Изофоты радиогалактики GR 0910+48, наложенные на оптическое изображение обзора DSS 2.

Если радиогалактика отождествляется в обзорах DSS 2 и/или Слоановском обзоре⁶, или в другом оптическом обзоре, в результате чего удастся собрать более 3-х фотометрических точек, то можно оценить возраст этой радиогалактики. Для этой цели применяется про-

⁶<http://www.sdss.org>

цедура оценки возраста по χ^2 , реализованная на сайте SED⁷ [16] (Рис.7). Для определения

The screenshot shows a web browser window with the URL http://sed.sao.ru/cgi-bin/age_z.pl. The page content includes:

Observational data

SYSTEM	F	I	Mag	err	AB
Landolt	U	3600		0.2	OFF
	B	4400		0.2	OFF
	V	5500		0.2	OFF
	R	6500		0.2	OFF
	I	8000		0.2	OFF
UKIRT	J	12000		0.2	OFF
	H	16500		0.2	OFF
	K	22000		0.2	OFF
Gunn	gGunn	5200		0.2	OFF
	rGunn	6630		0.2	OFF

Filter smoothing: ON

Model: PEGASE

Type of galaxy: E

Object name:

Redshift: Z unknown

Redshift limits: min 0 max 6

Age limits (Myr): min 200 max 16000

Extinction: OFF

RA: hh:mm:ss

DEC: +dd:mm:ss

Рис. 7: Web-страница SED с формой ввода фотометрических измерений для оценки возраста.

возраста используется база данных кривых распределения энергии в спектрах эллиптических галактик. Достаточный массив объектов на различных красных смещениях с фотометрическими данными позволяет изучать космологическую эволюцию радиогалактик.

3 Резюме

Данная работа является вводной частью к построению выборок радиоисточников с заданными свойствами. Выборки могут определяться набором параметров, включающих координаты, плотности потока, типы радиоспектров и спектральные индексы, что оказывается важным в астрофизике. При космологических исследованиях надо помнить, что радиоисточники являются эволюционирующими объектами. Эволюционные свойства (скорость и частота слияний) на разных красных смещениях отличаются. Поэтому космологический анализ проводится, как правило, для статистически больших выборок. Отдельный важный момент заключается в том, что иногда удается с использованием единственного уникального объекта (как, например, радиогалактики TN J0924-2201 на $z = 5.19$ [17] и RC J0311+0507 на $z = 4.514$ [18]) сделать выводы о свойствах объектов и сверхмассивных черных дырах, которые являются источником излучаемой энергии.

В предложенной работе практикант также знакомится с основными серверами и базами данных, используемыми в астрофизических исследованиях и являющимися стандартными

⁷<http://sed.sao.ru>

инструментами при изучении физических свойств небесных объектов. Как правило, базы данных, которые ежегодно пополняются, содержат архивы наблюдений на крупнейших инструментах и результаты обработки этих данных. Кроме того, существует дополнительный инструментарий в рамках Виртуальной обсерватории, позволяющий проводить более глубокий анализ сразу по всем базам данных в широком диапазоне длин волн. Такие методы несомненно открывают новые возможности в практической космологии.

Acknowledgements. В данных исследованиях используется открытый архив наблюдений NASA, NRAO и NOAO. Для анализа данных применяется база данных CATS [9] и система обработки радиоастрономических данных FADPS [15]. Автор признателен Фонду некоммерческих программ Дмитрия Зимина “Династия” за поддержку исследований по данной тематике. Автор также признателен Н.В.Верходановой за коррекцию стиля текста.

Список литературы

- [1] Верходанов О.В., Лекция 2. Космология с радиогалактиками. Этот сборник (2012).
- [2] Верходанов О.В., Парийский Ю.Н., *Радиогалактики и космология*, (М.:Физмалит, 2009).
- [3] Верходанов О.В., Лекция 1. Радиотелескопы в космологии. Этот сборник (2012).
- [4] Fanaroff B.L., Riley J.M., MNRAS **167**, 31p (1974).
- [5] White R.L., Becker R.H., Helfand D.J., and Gregg M.D., ApJ **475**, 479 (1997).
- [6] Копылов А.И. и др., АЖ **72**, 437 (1995).
- [7] Копылов А.И. и др., АЖ **72**, 613 (1995).
- [8] Parijskij Yu. N. et al., Bull. SAO, No **40**, 5 (1996).
- [9] Verkhodanov O.V., Trushkin S.A., Andernach H., and Chernenkov V.N., Bull. SAO **58**, 118 (2005), arXiv:0705.2959.
- [10] Douglas J.N. et al., Astron. J. **111**, 1945 (1996).
- [11] Condon J.J. et al., AJ, **115**, 1693 (1998).
- [12] Gregory P.C., Condon J.J., ApJS **75**, 1011 (1991).
- [13] de Ruiter H.R., Willis A.G., Arp H.C., Astron.Astrophys. **28**, 211 (1977).
- [14] O. V. Verkhodanov, In “*Problems of modern radio astronomy*” Proc. of the 27th Radio Astronomical Conf. (in Russian), Inst. Appl. Astronomy RAS, St.-Petersburg, V.1, P.322 (1997).
- [15] O. V. Verkhodanov, in “*Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*”, eds. G.Hunt & H.E.Payne, ASP Conf. Ser., **125**, 46 (1997).
- [16] Verkhodanov O.V. et al., Astron. Astrophys. Trans. **19**, 663 (2000).
- [17] van Breugel W. J. M., et al., ApJ **518**, 61 (1999), astro-ph/9904272.
- [18]) Копылов А.И., Госс Уи.М., Парийский Ю.Н., Соболева Н.С. и др., Письма в АЖ, **32**, 483 (2006), arXiv:0705.2771.