

УДК 52-77/14(083.8)

## ИЗУЧЕНИЕ ВЫБОРКИ КАТАЛОГА RC В ОБЛАСТИ, СОВПАДАЮЩЕЙ С ОБЗОРАМИ FIRST И SDSS. I. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ С РАДИОКАТАЛОГАМИ VLSS, TXS, NVSS, FIRST И GB6

© 2008 О. П. Желенкова<sup>1</sup>, А. И. Копылов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 8 апреля 2008 г.; принята в печать 19 апреля 2008 г.

Для каталога RC, полученного в 1980–1985 г.г. на радиотелескопе РАТАН-600 из глубокого обзора полосы неба, центрированной на склонении источника SS433, проведено оптическое отождествление радиоисточников в области (порядка 132 кв.град.), совпадающей с обзорами FIRST и SDSS. В качестве опорного каталога для уточнения координат радиоисточников использовался NVSS. Определена морфология примерно 75% объектов выборки и оценено соотношение однокомпонентных и многокомпонентных радиоисточников по радиокартам обзора FIRST. С привлечением данных из каталогов VLSS, TXS, NVSS, FIRST и GB6 на частотах 74, 365, 1400 и 4850 МГц проанализировано изменение формы спектров.

Key words: *радиоисточники*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В конце XX — начале XXI веков с появлением обширных цифровых обзоров неба и каталогов объектов в разных диапазонах (от низких радиочастот до жесткого рентгена) все большую актуальность приобретают подходы к изучению внегалактических объектов, в том числе радиоисточников, основанные на статистическом изучении свойств больших выборок, сформированных с использованием автоматизированных процедур обработки данных.

Отождествление источников в радиодиапазоне осложняется разным угловым разрешением, координатной точностью и предельной чувствительностью сравниваемых радиокаталогов. Изменение источника на разных частотах также необходимо учитывать в этой процедуре. Тем не менее для обзоров с высокой точностью определения координат (порядка угловой секунды), таких как NVSS [1] и FIRST [2], проводились массовые отождествления с оптическими обзорами. Так, например, в работе [3] выполнено отождествление 382892 радиоисточников обзора FIRST ( $S_{1.4\text{ GHz}}^{\text{lim}} > 1\text{ мЯн}$ ) с обзором APM [4] в области площадью 4150 кв.град. около северного галактического полюса. При кросс-идентификации для выявления многокомпонентных источников использовался алгоритм, учитывающий эмпирическое соотношение между плотностью потока и расстоянием между компонентами и приписывающий в соответствии с этим вероятность

соотнесения попавших в область поиска объектов с одним радиоисточником. При использовавшемся максимальном расстоянии между компонентами  $r < 120''$  оказалось, что около 8% источников являются двойными, около 3% — тройными и примерно 1% состоят из 4-х и более компонентов. С учетом этого общая доля отождествлений до предела ( $E=20.5^m$ ) обзора POSS-I [5] составила примерно 24%.

Радио и оптические свойства порядка 30000 радиоисточников FIRST, которые совпали по координатам с объектами ERD SDSS ( $r^* \sim 22.2^m$ ) [6], были исследованы в работе [7]. При автоматической кросс-идентификации использовалась область поиска радиусом  $1.5''$ , центрированная на положение оптического объекта. При первом проходе анализировались только точечные источники. Во втором проходе из неоттождествившихся с оптическими объектами радиоисточников FIRST были отобраны пары соседних источников (с разделением между парами  $r < 90''$ ) и выполнена повторная кросс-идентификация по положению средней точки между компонентами. В результате оказалось, что радиоисточники более сложной, чем точечная, морфологии составляют менее 10% от общего числа объектов каталога FIRST. Доля отождествленных радиоисточников оказалась порядка 27%.

В 1980–1985 г.г. на радиотелескопе РАТАН-600 был проведен многочастотный глубокий обзор полосы неба шириной  $20'$ , центрированной на

склонении источника SS433 ( $\delta_{1950.0} = +4^{\circ}54'$ ). Угловое разрешение обзора составило  $\Delta\alpha \sim 1'$  для  $\lambda = 7.6$  см (3.9 ГГц) [8, 9]. По наблюдательному материалу обзора был получен каталог RC, в который входит 1165 источников по публикациям [10] и [11]. Версия каталога в базе данных CATS [12], с которой мы работали, содержит 1209 объектов.

В связи с появлением в последние годы нескольких радиообзоров, а именно: VLSS [13, 14], TXS [15], GB6 [16], в область которых попала полоса обзора “Холод”, появилась возможность изучить свойства источников каталога RC, полученного на основе наблюдательного материала обзора, на частотах 74 и 365 МГц, а также 1.4 и 4.85 ГГц. Для уточнения координат выборки радиоисточников каталога RC и получения информации о морфологии радиоисточников для последующего оптического отождествления по обзору SDSS [17] были выбраны радиообзоры с высоким угловым разрешением и координатной точностью — NVSS и FIRST. Предполагалось отождествить все источники каталога RC, попавшие в область пересечения с обзорами FIRST и SDSS, а именно, полосу площадью примерно 132 кв.град. в пределах по  $\alpha_{2000.0}$  от  $8^h11^m$  до  $16^h25^m$  и  $\delta_{2000.0}$  от  $+4^{\circ}20'$  до  $+5^{\circ}24'$ . Подробное исследование источников с плотностями потоков от  $S_{3.9\text{ GHz}} \sim 11$  мЯн не проводилось ранее и может представлять определенный интерес, поскольку никакие дополнительные ограничения по морфологическому типу, спектральному индексу, угловым размерам для выборки не использовались.

Диаграмма направленности радиотелескопа PATAN-600 имеет “ножевую” форму при высоте наблюдений обзора “Холод”  $H = 51^{\circ}$ . Угловое разрешение телескопа примерно в 3 раза хуже, чем по прямому восхождению [18, 19]. В широко используемом алгоритме автоматической кросс-идентификации каталогов ConeSearch [20] применяется одинаковый радиус поиска по обеим координатам. В более сложном алгоритме SPECFIND [21], учитывающем при отождествлении радиоисточников угловое разрешение сравниваемых каталогов и спектральные особенности источников, считается, что диаграмма направленности телескопа имеет одинаковое разрешение по обеим координатам, а координатные ошибки меньше углового разрешения. Эти алгоритмы выдают низкий процент для каталога RC, поэтому отождествление проводилось при визуальном просмотре совмещенных оптических и радио изображений и анализе данных из выбранных для этой работы каталогов и обзоров. Подготовка информации для каждого источника выполнялась автоматически с помощью скриптовой программы на языке Perl для программного интерфейса интерактивного атласа неба Aladin [22].

В статье описана методика идентификации и приведены результаты отождествления каталога RC с обзорами VLSS, TXS, NVSS, FIRST и GB6. Опираясь на уточненные координаты и морфологию радиоисточников, мы выполнили оптическое отождествление выборки, результаты которого будут представлены в отдельной статье. При работе с разнородными данными каталогов и обзоров, кроме Aladin, использовались программные средства виртуальной обсерватории Vizier [23] и TOPCAT [24].

## 2. МЕТОДИКА ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ

Точность определения координат источников, наблюдаемых на PATAN-600, зависит от их положения по высоте  $\Delta H$  от центра диаграммы направленности телескопа и плотности потока [19, 25]. Для нашей выборки медианное значение координатных ошибок источников каталога RC по версии, приведенной в базе данных CATS, составляет по прямому восхождению —  $0.58^s$  и по склонению —  $38.0''$ . Для оптического отождествления точность координат радиоисточника должна быть не хуже одной угловой секунды. Уточнение координат источников проводилось по обзорам NVSS и FIRST. Каталог RC имеет близкое к NVSS угловое разрешение по прямому восхождению, поэтому сначала рассматривалось положение источника каталога RC относительно NVSS. Высокое угловое разрешение обзора FIRST дает подробную информацию о структуре источника, что является необходимым при оптических отождествлениях, но усложняет идентификацию объекта в радиодиапазоне.

Для каждого источника из нашего списка результаты запросов к выбранным информационным ресурсам сохранялись в стеке Aladin. Для визуализации расположения источников относительно друг друга в стеке строились изофоты изображений из радиообзоров NVSS и FIRST, а также отмечалось положение объектов каталогов.

Перечислим условия в порядке убывания значимости, выполнение которых принималось во внимание при отождествлении источника каталога RC с объектом опорного каталога.

- Координатное совпадение по прямому восхождению — если расстояние между радиоисточником из каталога RC и объектом NVSS или FIRST удовлетворяет неравенству  $r < 3\sigma$ , где  $\sigma$  — приведенная в каталоге RC ошибка координат по прямому восхождению.
- Координатное совпадение по склонению. Аналогично совпадению по  $\alpha_{2000.0}$ ; расстояние между положением RC и объектом NVSS или FIRST  $r < 3\sigma$ .

- Совпадение плотностей потока для объекта из исследуемого и опорного каталогов. Вызывают сомнения случаи, когда при координатном совпадении источник не согласуется по плотности потока с NVSS (при пересчете плотностей потоков полагаем, что спектральный индекс источника  $\alpha \sim 0.7$ ,  $S(\nu) \sim \nu^{-\alpha}$ ).
- Присутствие соседних источников. Если рядом с источником каталога RC есть не один, а два или несколько источников опорного каталога, попадающих в диаграмму направленности PATAH-600, то они блендируются и возникает неоднозначная ситуация при идентификации. В этом случае мы считали, что наибольший вклад дает самый яркий источник и отождествляли объект каталога RC с ним.

Мы учитывали, что яркие объекты, расположенные на расстояниях, превосходящих размер диаграммы направленности, могут повлиять на координатные измерения, а также внести искажения в величину плотности потока. Группа слабых объектов, попавшая в диаграмму, может повлиять сходным образом.

Чтобы учесть влияние соседних источников и разрешить неоднозначности в отождествлениях использовался атлас, отображающий полосу обзора “Холод”. На рисунках областей, размерами 15 минут по прямому восхождению, а по склонению —  $1^\circ 30'$ , нанесены источники каталога RC с разметкой координатных ошибок ( $3\sigma$ ), а также положения и плотности потоков радиосточников VLSS, NVSS, TXS, GB6, PMN и ряда других каталогов [27].

Когда плотность потока источника на 3.9 ГГц оказывается больше, чем плотность потока на 1.4 ГГц по данным опорного каталога, требуется дополнительная информация, подтверждающая ее рост к более высоким частотам. В этих случаях мы использовали как каталог, так и обзор GB6. В каталог обычно включаются объекты с плотностью потока выше  $5\sigma$  уровня отношения сигнал/шум. Источники с плотностью потока на уровне  $3\sigma - 4\sigma$ , отсутствующие в каталоге GB6, обнаруживаются при визуальном просмотре изображений обзора GB6. Эта дополнительная информация помогала при разборе неоднозначных случаев отождествления.

После просмотра стеков, атласа и сравнения данных выбранных радиокаталогов источники каталога RC были разделены на три группы:

- “RC” — источник уверенно отождествляется, кроме NVSS и FIRST, еще, по крайней

мере, в одном из каталогов VLSS, TXS, GB6;

- “rc” — отождествляется с источником обзора NVSS и/или FIRST;
- “X” — не удалось установить однозначного соответствия с источниками из других каталогов.

Из 432-х радиосточников каталога RC, попавших в область пересечения с SDSS и FIRST, к группе “RC” было отнесено 190 (44%) источников, к “rc” — 130 (30%), к “X” — 98 (23%) и 14 (3%) “twin” объектов. В каталоге RC имеются объекты с пометкой “t” (twin), которая означает, что для источника имеются варианты отождествлений при интерпретации наблюдательных сканов в меридиане и азимуте и как следствие — варианты определения координат [10]. Далее рассматривались 320 радиосточников, относящихся к группам “RC” и “rc”.

### 3. УГЛОВЫЕ РАЗМЕРЫ, ЧИСЛО КОМПОНЕНТ И СТРУКТУРА ИСТОЧНИКОВ

Для объектов каталога RC, отнесенных к группам “RC” и “rc”, были определены угловые размеры, число компонент и морфологическая структура по данным обзора FIRST. Чтобы объединить объекты FIRST в один источник или наоборот отнести к независимым источникам, для каждого радиосточника каталога RC анализировалась контурная карта, нарисованная с помощью сервиса, строящего изофоты радиоизображений из обзора FIRST без потери углового разрешения [28].

Угловые размеры источников RC оценивались в зависимости от морфологической структуры, определенной по изофотам изображений обзора FIRST. Если источник каталога RC однокомпонентный, то за его угловой размер принималась величина большей полуоси источника каталога FIRST. Угловой размер многокомпонентных источников мы определяли средствами Aladin как расстояние между двумя самыми разнесенными компонентами.

В Таблице 1 приведены угловые размеры и доля однокомпонентных и многокомпонентных источников. В подсчеты вошли 318 источников из 320 (два слабых протяженных источника из обзора NVSS отсутствуют в FIRST). Отметим, что часть однокомпонентных источников разрешается и имеет структуру отличную от точечной.

По результатам автоматической кросс-идентификации обзора FIRST с SDSS в статье [7] приведено соотношение однокомпонентных и многокомпонентных источников. Оказывается, что более

**Таблица 1.** Доля одно- и многокомпонентных источников и угловые размеры (Largest Angular Size или LAS) для 318 объектов из каталога RC (по данным обзора FIRST)

Число компонентов	Доля в выборке (%)	Число объектов	$LAS_{median}$ (")
1	56	177	1.83
2	27	85	17.5
3	11	35	33.1
4	4	14	60
$\geq 5$	2	7	94

90% радиисточников являются однокомпонентными, а около 10% имеют несколько компонентов. Похожий результат (примерно 12% многокомпонентных источников) приводится в работе [3] при отождествлении FIRST и APM программными средствами, хотя в работе [29] полагается, что их доля больше, и она оценивается в одну треть от общего числа объектов каталога. Авторы этой работы считают, что если между объектами каталога расстояние не превышает  $0.02^\circ$ , то они являются компонентами одного источника. В нашей выборке однокомпонентных источников оказалось на 20% меньше приведенной оценки в статье [29] и в полтора раза меньше, чем в работах [3] и [7]. Если сравнить число объектов каталога FIRST с числом реальных радиисточников, то для нашей выборки получится отношение 5:3, т.е. на 5 объектов приходится 3 радиисточника.

В работе [30] приводится морфологическая классификация радиисточников обзора MIT-Green Bank (MG) по картам, полученным на VLA на частоте 4885 МГц с разрешением  $0.4''$  или  $1.2''$ , которая включает 10 типов, а именно:

- 1) point — точечный, не разрешающийся на компоненты радиисточник;
- 2) quasi-point — доминирует точечное ядро со слабовыраженной структурой;
- 3) diffuse — разрешаемый источник со слабо выделенными пиками интенсивности;
- 4) core-jet — неразрешающийся пик с продолжением в одну сторону или с близким слабым протяженным компонентом;
- 5) cometary — похожий на тип 4, но с разрешающимся пиком;

- 6) double — источник с двумя приблизительно симметричными и одинаковыми по потоку компонентами;
- 7) triple — тройной источник;
- 8) multiple — четыре или больше хорошо определенных пика;
- 9) core-double — в отличие от типа 7 имеет более слабое ядро и протяженные компоненты;
- 10) jet — два относительно симметричных джета, иногда с определяемым ядром, без других компактных областей.

Поскольку мы использовали для классификации изображения обзора FIRST с угловым разрешением  $5.4''$ , достаточно близким к разрешению обзора MG-VLA [30], то взяли за основу описанную выше схему, но с некоторыми изменениями, связанными с желанием отразить связь между структурой радиисточника и положением родительской галактики, которая во многих случаях определенно прослеживается. Мы выделили следующие морфологические типы:

- 1) core (C) — точечный, не разрешающийся на компоненты радиисточник (включает point и quasi-point). Оптический объект совпадает с максимумом плотности потока в радиодиапазоне;
- 2) core-jet (CJ) — неразрешающийся пик с продолжением в одну сторону или с близким слабым протяженным компонентом (включает core-jet и cometary); оптический объект совпадает с максимумом плотности потока в радиодиапазоне;

**Таблица 2.** Распределение 320 радиоисточников каталога RC по морфологическому типу

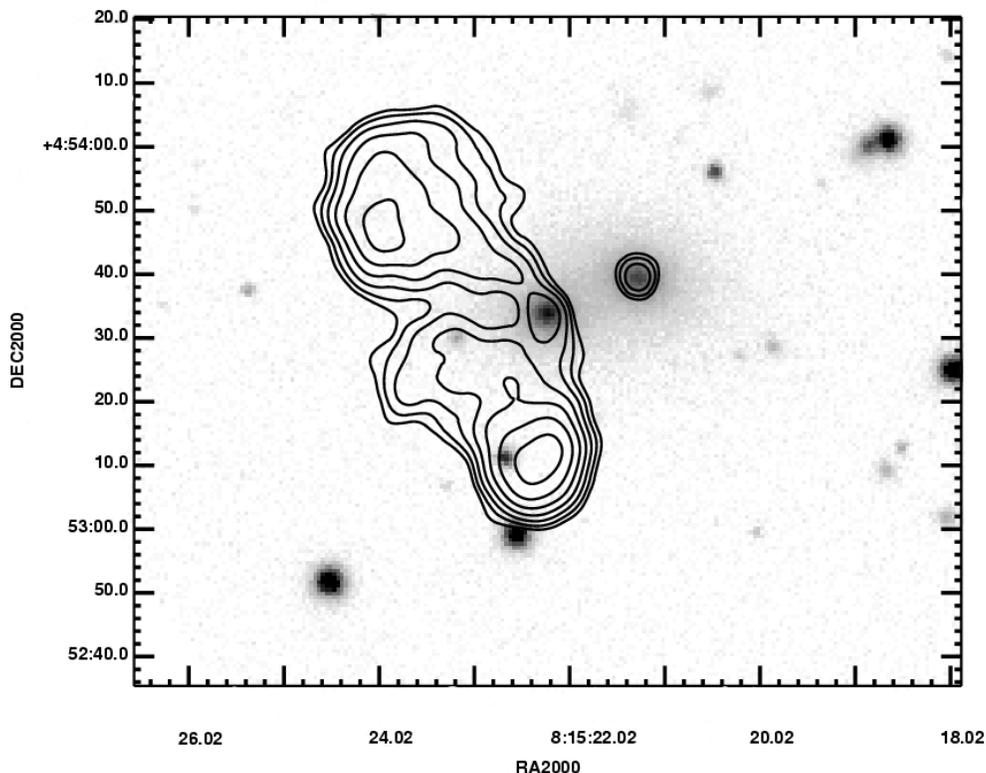
Тип	Доля в выборке (%)	Число объектов	$LAS_{median}$ (")
C (core)	39	125	1.42
CL (core-lobe)	6	18	12.5
CJ (core-jet)	8	24	7.28
D (double)	33	106	13.6
DC (core-double)	6	19	49.8
DD (double-double)	1	4	60.3
T (triple)	6	20	34.9
M (multiple)	0.5	2	33.1
E (diffuse)	0.5	2	—

- 3) core-lobe (CL) — источник с ядром и спадающей к краям яркостью в компонентах (включает jet), оптический объект совпадает с максимумом плотности потока в радиодиапазоне;
- 4) double (D) — двухкомпонентный радиоисточник. Яркость компонентов больше к краям источника (FR II), оптический объект расположен между ними. К двойным относятся еще два типа:
  - core-double (DC) — двухкомпонентный радиоисточник со слабым ядром, оптический объект совпадает с ядром;
  - double-double (DD) — похож на D, но компоненты имеют выраженную двойную структуру, оптический объект расположен между радиокомпонентами;
- 5) triple (T) — тройной источник. Центральный компонент похож на точечный источник, оптический объект совпадает с центральным компонентом;
- 6) multiple (M) — многокомпонентный источник, не соотносящийся с перечисленными случаями по структуре, для оптического отождествления требуется дополнительная информация;
- 7) diffuse или extended (E) — протяженный источник (может отсутствовать в FIRST, хотя определяется в NVSS), для оптического отождествления требуется дополнительная информация.

В Таблице 2 приведено распределение 320 радиоисточников каталога RC по морфологическим типам, а также медианные значения углового размера для каждой группы. Следует отметить, что при отнесении источника к тому или иному типу просматривались изображения обзоров NVSS и FIRST, а также учитывалось положение вероятного кандидата для оптического отождествления.

Радиоисточники с асимметричной структурой, так называемые “winged” или “X-shaped” являются небольшой и интересной популяцией радиогалактик [31]. В дополнение к обычной паре радиокомпонентов у этих объектов имеется пара излучающих областей с низкой поверхностной яркостью, которые образуют крылья или имеют X-образную форму. Предположительно эта форма является результатом истечения плазмы из областей горячих пятен в неоднородную среду, окружающую радиоисточник [32]. Второе объяснение необычной структуры источника связывают с тем, что слабые по яркости области могут быть остаточными явлениями быстрой смены ориентации вращения системы супермассивной черной дыры (SMBH) и аккреционного диска, произошедшей из-за относительно недавнего слияния двойной SMBH [33]. X-shaped источники интересны как системы, связываемые с двойными черными дырами [26] и повторяющимися фазами активности радиоисточника в родительской галактике [34]. Мы подсчитали количество радиоисточников со структурой похожей на “winged” или “X-shaped”. Они составляют примерно 4% от общего числа рассматриваемых источников.

Встречаются группы из нескольких источников, а также пары, находящиеся на расстоянии 1–1.5 угловых минут друг от друга. Таких случаев оказалось



**Рис. 1.** RC J0815+0453. Группа из двух радиосточников. Каждый источник отождествляется с эллиптической галактикой. Изофоты изображения из обзора FIRST наложены на область из обзора SDSS (г фильтр).

около 7%. На Рис. 1 приведен интересный пример пары двойного и слабого точечного радиосточников, отождествляющихся с двумя эллиптическими галактиками.

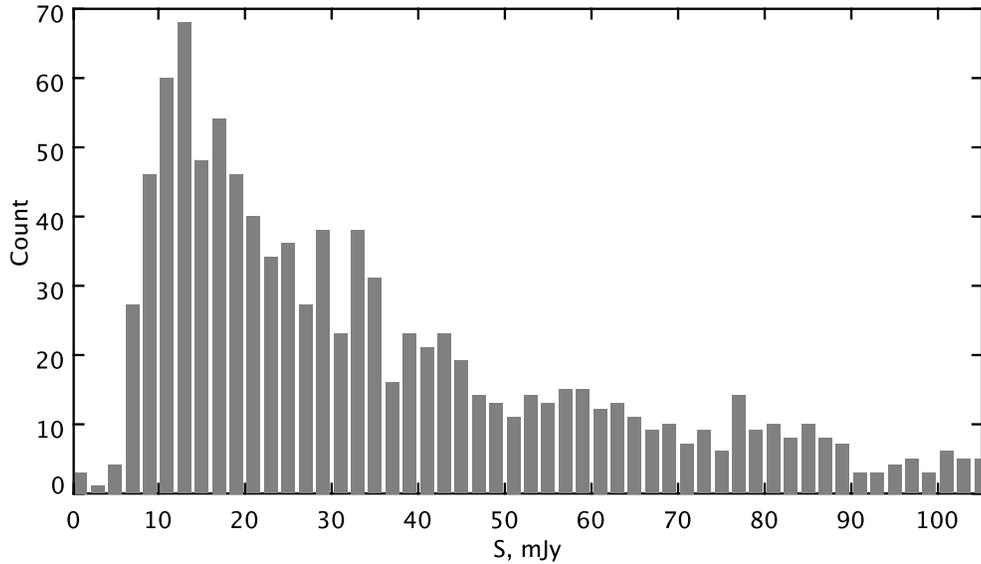
Результаты отождествления радиосточников с обзорами VLSS, TXS, NVSS, FIRST, GB6, угловые размеры, морфология, спектральные индексы представлены в электронном виде в таблице по адресу <http://www.sao.ru/hq/zhe/RCriResInn.html>. Там же приведено описание колонок и контурные карты радиосточников каталога RC, построенные по изображениям обзора FIRST.

#### 4. СПЕКТРЫ РАДИОИСТОЧНИКОВ В ДИАПАЗОНЕ 74–4850 МГц

В центральной части обзора “Холод” каталог RC имеет полноту близкую к единице для радиосточников с плотностью потока  $S_{3.9\text{GHz}} > 15$  мЯн [25]. К этой области относится полоса шириной по склонению  $10'$ , центрированная по склонению источника SS 433 на эпоху обзора. На Рис. 2 показано распределение источников по плотности потока. Завал для слабых источников начинается для  $S_{3.9\text{GHz}} < 11$ –12 мЯн. В 20-минутной полосе объекты с плотностью потока  $S_{3.9\text{GHz}} \geq 30$  мЯн представлены в каталоге без

пропусков. При формировании двух ограниченных по плотности потока выборок учитывалась разность склонения SS 433 и координат радиосточника, уточненных по NVSS и пересчитанных на эпоху наблюдений (15.04.1980), а также величина плотности потока, уточненная по скорректированной  $\Delta H$  и расчетной диаграмме направленности телескопа для высоты  $H = 51^\circ$ . Одна полная выборка включает источники с отклонением по высоте от центра диаграммы  $\Delta H \leq |5'|$  и плотностью потока  $S_{3.9\text{GHz}} \geq 11$  мЯн (130 объектов). Площадь, занимаемая выборкой, составляет примерно 21 кв.град. Во вторую выборку входят источники (117 объектов) с  $\Delta H \leq |10'|$  и  $S_{3.9\text{GHz}} \geq 30$  мЯн (площадь — примерно 41 кв.град.). Выборки частично перекрываются, так 47% источников второй выборки входят в первую. Для краткости первую выборку дальше в тексте будем обозначать 1S, вторую — 2S.

По изображениям обзора GB6 для источников выборки, отсутствовавших в каталоге GB6, произведена оценка плотности потока на частоте 4.85 ГГц сравнением пиковых значений интенсивностей в области исследуемого радиосточника и близлежащих источников, имеющихся в каталоге GB6. Отметим, что в каталоге GB6



**Рис. 2.** Распределение источников каталога RC по величине плотности потока на частоте 3.9 ГГц (источники ярче 105 мЯн не нанесены на график). Число источников резко уменьшается для плотностей потока < 12 мЯн.

**Таблица 3.** Распределение радиоисточников по типу спектра (по спектральному индексу  $\alpha_{1.4-4.85 GHz}$ ) в выборках 1S ( $\Delta H \leq |5'|$ ;  $S_{3.9 GHz} \geq 11$  мЯн) и 2S ( $\Delta H \leq |10'|$ ;  $S_{3.9 GHz} \geq 30$  мЯн)

Спектр	Выборка	Доля в выборке (%)	$N_{obj}$	$LAS_{median}$ (")	$S_{1.4 GHz}$ (mJy)	$S_{3.9 GHz}$ (mJy)	$S_{4.85 GHz}$ (mJy)	$\alpha_{median}$
I	1S	10	13	2.33	12.1	14	20	-0.32
	2S	6	7	2.33	34.3	68	51	-0.32
F	1S	27	35	2.34	39.1	22	28	0.31
	2S	22	26	2.27	74.2	45	46	0.25
S	1S	54	70	10.6	82.3	31	33	0.76
	2S	56	65	10.26	146.5	57	59	0.76
U	1S	9	12	17.1	94.5	31	22	1.17
	2S	16	19	17.1	146.1	69	39	1.12

предел обнаружения источников по уровню  $5\sigma$  на склонении  $\delta \sim +5^\circ$  и в области, ограниченной по прямому восхождению  $8^h < \alpha_{2000.0} < 12^h$  и  $14^h 40^m < \alpha_{2000.0} < 16^h 30^m$  составляет примерно 28 мЯн, а для области  $12^h < \alpha_{2000.0} < 14^h 40^m$  — около 37 мЯн [16]. Из 130 источников выборки 1S 51 источник отождествился с каталогом GB6 и для 79 проведена оценка плотности потока по изображениям обзора GB6, для выборки 2S соответственно — 85 и 32.

(см. Табл. 3) мы разбили источники на четыре группы:

- инверсные (I),  $\alpha < -0.1$ ;
- плоские (F),  $-0.1 \leq \alpha < 0.5$ ;
- крутые (S),  $0.5 \leq \alpha < 1$ ;
- ультракрутые (U),  $\alpha \geq 1$ .

Медианное значение плотности потока источников первой выборки 1S  $S_{3.9 GHz}^{median} = 26$  мЯн, вто-

По величине спектрального индекса  $\alpha_{1.4-4.85 GHz}$

рой 2S —  $S_{3.9GHz}^{median} = 57$  мЯн). При сравнении спектральных индексов радиоисточников получается, что в диапазоне 1.4 — 4.85 ГГц с уменьшением плотности потока число источников с инверсными и плоскими спектрами немного увеличивается, а число источников с крутыми и ультракрутыми спектрами уменьшается (см. Табл. 3 и Рис. 3).

Источники с плоскими и инверсными спектрами в выборках 1S и 2S оказались более компактными по угловым размерам (см. Табл. 3), чем источники с крутыми и ультракрутыми спектрами.

Для 143-х источников, отождествленных в трех или четырех каталогах VLSS, TXS, NVSS и GB6, имеется дополнительная информация по плотностям потока, что позволяет проследить поведение их спектров в диапазоне 74 — 4850 МГц. Если для объекта отсутствовали данные в каталоге VLSS или GB6, то мы оценивали величину плотности потока по изображениям обзоров VLSS или GB6, сравнивая пиковое значение в области радиоисточника с пиковыми значениями близлежащих источников, присутствующих в этих каталогах. Для источников, отсутствующих в каталоге TXS, мы приняли в качестве оценки плотности потока предельную чувствительность каталога 150 мЯн. Далее мы вычислили двухчастотные спектральные индексы  $\alpha_{74-365 MHz}$ ,  $\alpha_{365 MHz-1.4 GHz}$ ,  $\alpha_{1.4-4.85 GHz}$ . С инверсным спектральным индексом  $\alpha_{74-365 MHz}$  оказалось 10% источников, с плоским — 38%, крутым — 46% и ультракрутым — 6%. Источники, попавшие в первую группу, оказались самыми компактными ( $LAS_{median} = 1.02''$ ) по сравнению с остальными.

В каждой группе мы проследили изменение формы спектра источников при переходе от низких к более высоким частотам, аппроксимируя спектр параболой с помощью процедуры *spg* штатной системы обработки FADPS 1-го облучателя РАТАН-600 [35], и символами I, F, S, U обозначили соответствующие области спектра при переходе от участка к участку. Получилось следующее (см. Табл. 4):

- 1) источники с  $\alpha_{74-365 MHz} < -0.1$  имеют два типа спектров: одна группа на 1.4 ГГц имеет плоский спектр, который к 4.85 ГГц становится крутым (IFS) или ультракрутым (IFU), и вторая группа — ультракрутой спектр на 1.4 ГГц;
- 2) источники с плоским спектром можно разделить на три группы:
  - у большей части источников (29% от рассматриваемого числа) спектр становится круче с увеличением частоты (FS, FU);

- небольшое количество источников сохраняют плоский спектр в рассматриваемом диапазоне (F) или становятся инверсными к высоким частотам (FI);

- в третью группу входят спектры, которые имеют  $\alpha_{365 MHz-1.4 GHz} > 0.5$ , а к 4.85 ГГц уплощаются (FSF);

3) источники с крутыми спектрами также разделяются на три группы:

- большинство (34%) имеет крутые спектры, сохраняющие при переходе от диапазона к диапазону  $\alpha > 0.5$  (тип спектра, который обозначается S, аппроксимируется линейной функцией. Sc и SU — аппроксимируются параболой. К высоким частотам у SU спектр становится ультракрутым, а у Sc остается крутым);

- небольшое число источников с уплощающимися или инверсными спектрами к 4.85 ГГц (SF — 3.5%, SI — 1.5%);

- третья группа — переход от крутого к плоскому спектру, а затем опять к крутому (SFS);

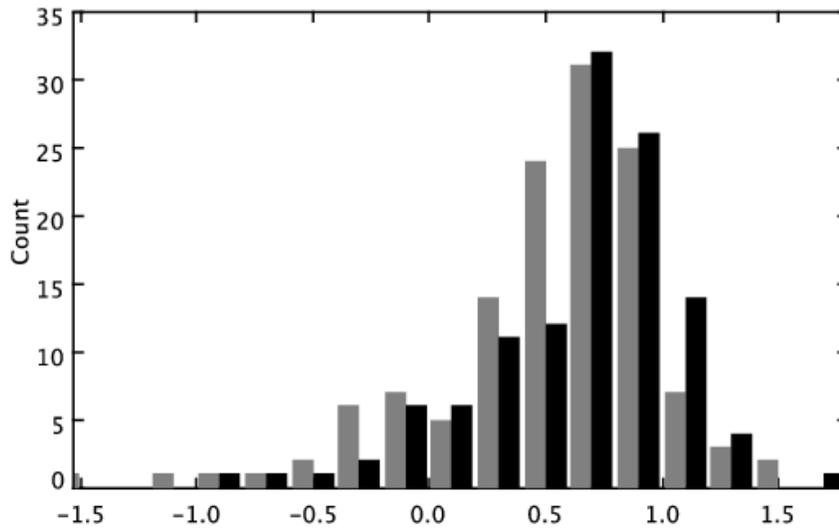
4) малочисленная группа источников с ультракрутыми спектрами на частотах 74 — 365 МГц подразделяется на две подгруппы:

- одна сохраняет крутой наклон на более высоких частотах, но менее крутой, чем начальный (US);

- у другой — спектр становится плоским (UF) и даже инверсным (UFI).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для 432 радиоисточников каталога RC, попадающих в область пересечения с обзорами SDSS и FIRST, проведена идентификация с радиокаatalogами FIRST, NVSS, TXS, VLSS и GB6. В статистических исследованиях и оптическом отождествлении использовались источники (около 75% от общего числа), которые идентифицированы с каталогами NVSS и/или FIRST. Большая часть из оставшихся объектов каталога RC (примерно 25%) являются либо ложными, либо случаями блендирования двух или нескольких реальных объектов, для которых сложно определить индивидуальные характеристики по наблюдениям обзора “Холод”.



**Рис. 3.** Распределение спектрального индекса  $\alpha_{1.4\text{ GHz}-4.85\text{ GHz}}$  для источников из центральной части обзора “Холод”. Серым цветом обозначены источники, вошедшие в выборку 1S ( $\Delta H \leq |5'|$ ;  $S_{3.9\text{ GHz}} \geq 11$  мЯн), черным цветом – в выборку 2S ( $\Delta H \leq |10'|$ ;  $S_{3.9\text{ GHz}} \geq 30$  мЯн). В выборке 1S, включающей более слабые по плотности потока на частоте 3.9 ГГц источники по сравнению с выборкой 2S, имеется больше плоских и инверсных спектров, чем в 2S.

**Таблица 4.** Изменение спектральных индексов  $\alpha_{74-365\text{ MHz}}$ ,  $\alpha_{365\text{ MHz}-1.4\text{ GHz}}$ ,  $\alpha_{1.4-4.85\text{ GHz}}$  для 143 радиисточников каталога RC по данным обзорам VLSS, TXS, NVSS и GB6

$\alpha_{74-365\text{ MHz}}$	Форма спектра	Доля в выборке (%)	Число объектов	$LAS_{median}$ (")
I 15 (10%)	IFS	3	4	0.91
	IFU	2	3	1.35
	IU	5	8	1.02
F 55 (38%)	F	4	6	11.0
	FS	15	22	5.25
	FU	14	20	7.02
	FI	1.5	2	1.40
	FSF	3.5	5	4.83
S 65 (46%)	S	11	15	13.6
	Sc	13	19	20.9
	SU	10	14	14.0
	SF	3.5	5	4.57
	SI	1.5	2	5.9
	SFS	7	10	51.6
U 8 (6%)	US	2	3	53.0
	UF	3	4	16.5
	UFI	1	1	0.76

По данным обзора FIRST подсчитано число компонентов (входов в каталог FIRST) для исследуемых источников. Оказалось, что однокомпонентные источники составляют около 55% выборки, двухкомпонентные и более — 45%. Этот результат не совпадает с результатами автоматической кросс-идентификации FIRST с SDSS и APM [3, 7], но близок к оценке (66%) однокомпонентных источников в обзоре FIRST, приведенной в работе [29]. Доля радиоисточников, которые сложно отождествить автоматически программными средствами, составляет примерно 15% для обзора с высоким угловым разрешением (таким, как у FIRST).

В центральной части обзора “Холод” каталог RC имеет полноту близкую к единице для радиоисточников с плотностью потока  $S_{3.9\text{GHz}} > 15$  мЯн, и к краям полосы она уменьшается [25]. По этой причине для сравнения параметров радиоисточников рассматривались две полные выборки в центральной части обзора. В первую выборку включены источники с отклонением по высоте от центра диаграммы направленности радиотелескопа  $\Delta H \leq |5'|$  и плотностью потока  $S_{3.9\text{GHz}} \geq 11$  мЯн. Площадь, занимаемая выборкой, составляет примерно 21 кв.град. Во вторую выборку вошли источники с  $\Delta H \leq |10'|$  и  $S_{3.9\text{GHz}} > 29$  мЯн (площадь около 41 кв.град.). В первую выборку (1S) попало 130 объектов, во вторую (2S) — 117. Выборки частично перекрываются.

Определив спектральный индекс  $\alpha_{1.4-4.85\text{GHz}}$  для всех источников в обеих выборках, мы разбили их на четыре группы:

- инверсные (I),  $\alpha < -0.1$ ;
- плоские (F),  $0.1 \leq \alpha < 0.5$ ;
- крутые (S),  $0.5 \leq \alpha < 1$ ;
- ультракрутые (U),  $\alpha \geq 1$ .

В результате сравнения двух выборок, первая из которых более глубокая по плотности потока, получается, что в диапазоне 1.4 — 4.85 ГГц с уменьшением плотности потока число источников с инверсными и плоскими спектрами немного увеличивается, т.е. в первой выборке они составляют 37%, а во второй — 28%. Число источников с крутыми и ультракрутыми спектрами уменьшается, а именно, в выборке 1S таких источников 63%, в 2S — 72%. Распределение по спектральному индексу  $\alpha_{1.4-4.85\text{GHz}}$  для выборки 2S смещено относительно 1S в сторону более крутых спектральных индексов.

Источники с плоскими и инверсными спектрами в выборках 1S и 2S оказались более компактными

по угловым размерам, чем источники с крутыми и ультракрутыми спектрами.

Для источников, отождествленных в каталогах VLSS, TXS, NVSS и GB6, имеется дополнительная информация по плотностям потока для сравнения поведения радиоспектров в диапазоне 74 — 4850 МГц. Мы вычислили двухчастотные спектральные индексы  $\alpha_{74-365\text{MHz}}$ ,  $\alpha_{365\text{MHz}-1.4\text{GHz}}$ ,  $\alpha_{1.4-4.85\text{GHz}}$ , аппроксимировали спектры параболической функцией. Оказалось, что можно выделить 8 групп спектров, из которых большинство (около 60%) имеют плоские или крутые спектры на 74 — 365 МГц и становятся или остаются крутыми на высоких частотах. Имеется около 10% источников с S-образной формой спектра (то есть FSF ~3% и SFS — 7%). Редко встречаются источники с переходом от плоского спектра или крутого к инверсному (менее 3%). Радиоисточники, имеющие инверсный спектр на одном из участков рассматриваемого диапазона, оказались компактными по угловым размерам.

Для дальнейшего оптического отождествления уделено особое внимание морфологической классификации радиоисточников. Источники классифицированы по морфологической схеме, в основе которой лежит соотношение структуры радиоисточника и положения оптического объекта. 39% источников отнесены по типу к точечным (C core), 40% — к двойным источникам (D — double-lobe, DC — double-core-lobe, DD — double-double), около 20% — к тройным, многокомпонентным и др.

Для радиоисточников каталога RC, идентифицированных с объектами других радиокаталогов, проведено оптическое отождествление с каталогами SDSS, USNO и 2MASS, результаты которого будут представлены в отдельной статье.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Е. К. Майоровой за предоставленную расчетную диаграмму направленности РАТАН-600.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. J. Condon et al., *Astronom. J.* **115**, 1693 (1998).
2. R. H. Becker et al., *Astrophys. J.* **475**, 479 (1997).
3. R. G. McMahon et al., *Astrophys. J. Suppl.* **143**, 1 (2002).
4. R. G. McMahon et al., *VizieR On-line Data Catalog: 1267* (Cambridge, CB3 OHA, UK, Institute of Astronomy, 2000)
5. G. O. Abell, *Astronomical Society of the Pacific Leaflets* **8**, 121 (1959).

6. C. Stoughton et al., *Astronom. J.* 123, 485 (2002).
7. Ž. Ivezić et al., *Astronom. J.* 124, 2364 (2002).
8. А. Б. Берлин и др., *Письма в АЖ* 7, 290 (1981).
9. А. Б. Берлин и др., *Письма в АЖ* 9, 211 (1983).
10. Yu. N. Pariiskij et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* 87, 1 (1991).
11. Yu. N. Pariiskij et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* 96, 583 (1992).
12. O. V. Verkhodanov et al., *Baltic Astronomy* 9, 604 (2000).
13. A. S. Cohen et al., *Astronomische Nachrichten* 327, 262 (2006).
14. A. S. Cohen et al., *Astronom. J.* 134, 1245 (2007).
15. J. N. Douglas et al., *Astronom. J.* 111, 1945 (1996).
16. P. C. Gregory et al., *Astrophys. J. Suppl.* 103, 427 (1996).
17. J. K. Adelman-McCarthy et al., *Astrophys. J. Suppl.* 172, 634 (2007).
18. Н. А. Есепкина и др., *Радиотехника и электроника* 6, No 12, 1947 (1961).
19. Е. К. Майорова, С. А. Трушкин, *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.* 54, 89 (2002).
20. R. Williams et al., <http://www.ivoa.net/Documents/latest/ConeSearch.html>.
21. B. Vollmer et al., *Astronom. and Astrophys.* 436, 757 (2005).
22. F. Ochsenbein et al., in *in Proceedings of the ADASS XIV, Pasadena, USA, 2004*, Eds.: P. Shopbell, M. Britton, and R. Ebert (ASP Conf. Series, 347, 2005), p.193.
23. F. Ochsenbein et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* 143, 23 (2000).
24. M. B. Taylor, in *in Proceedings of the ADASS XIV, Pasadena, USA, 2004*, Eds.: P. Shopbell, M. Britton, and R. Ebert (ASP Conf. Series, 347, 2005), p.29.
25. Н. С. Соболева, автореферат докторской диссертации, (САО РАН, Нижний Архыз, 1992) 47с.
26. S. Komossa, in *Proceedings of the International Conference The Astrophysics of Gravitational Wave Sources* (AIP Conf. Proc., 686, 2003), p.161.
27. А. И. Копылов, <http://www.sao.ru/hq/zhe/ATLAS>.
28. FIRST cutout service, <http://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/FIRST/>.
29. C. M. Cress et al., *Astronom. J.* 473, 7 (1996).
30. C. R. Lawrence et al., *Astrophys. J. Suppl.* 61, 105 (1986).
31. C. C Cheung, *Astronom. J.* 133, 2097 (2007).
32. J. P. Leahy and A. G. Williams, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* 210, 92 (1984).
33. J. Dennett-Thorpe et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* 330, 609 (2002).
34. F. K. Liu, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* 347, 1357 (2004).
35. O. V. Verkhodanov, in *in Proceedings of the ADASS VI, Pasadena, USA, 1996*, Eds.: G. Hunt and H. E. Pyne (ASP Conf. Series, 125, 1997), p.47.

## ANALYSIS OF THE RC CATALOG SAMPLE IN THE REGION OVERLAPPING WITH THE REGIONS OF THE FIRST AND SDSS SURVEYS. I. IDENTIFICATION OF SOURCES WITH THE VLSS, TXS, NVSS, FIRST, AND GB6 CATALOGS

O. P. Zhelenkova, A. I. Kopylov

Radio sources of the RC catalog produced in 1980–1985 at RATAN–600 radio telescope based on a deep survey of a sky strip centered on the declination of the SS433 source are optically identified in the region overlapping with FIRST and SDSS surveys (about 132 sq. deg. large). The NVSS catalog was used as the reference catalog for refining the coordinates of the radio sources. The morphology is found for about 75% of the objects of the sample and the ratio of single-to-multicomponent radio sources is computed based on FIRST radio maps. The 74, 365, 1400, and 4850 MHz data of the VLSS, TXS, NVSS, FIRST, and GB6 catalogs are used to analyze the variation of the form of the spectra.