

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

П Р Е П Р И Н Т 217

Желенкова О.П., Копылов А.И.

Изучение выборки каталога RC в области, совпадающей с обзорами FIRST и SDSS. I. Идентификация источников с радиокаталогами VLSS, TXS, NVSS, FIRST и GB6.

Нижний Архыз
2007

Изучение выборки каталога RC в области, совпадающей с обзорами FIRST и SDSS. I. Идентификация источников с радиокаталогами VLSS, TXS, NVSS, FIRST и GB6

Желенкова О.П., Копылов А.И.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, п.Нижний Архыз, 369167, Россия

Аннотация. Для каталога RC, полученного в 1980–1985гг на радиотелескопе РТАН-600 из глубокого обзора полосы неба, центрированной на склонении источника SS433, проведено отождествление радиоисточников в области (~ 132 кв.угл.град.), совпадающей с обзорами FIRST и SDSS. В выборку вошло около трети источников RC. В качестве опорного каталога для уточнения координат радиоисточников использовался NVSS. Определена морфология $\sim 75\%$ 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 поведение спектров радиоисточников.

1. Введение

В конце 20 – начале 21 века произошло разделение методов исследования радиоисточников на два направления. Один подход, который применялся с самого начала радиоастрономических наблюдений, состоит в детальном изучении источника, получении максимальной информации о нем. С появлением больших цифровых обзоров в разных спектральных диапазонах стал развиваться второй подход, который нацелен на изучение статистических свойств популяции радиоисточников.

Отождествление объектов в радиодиапазоне осложняется разным угловым разрешением и предельной чувствительностью по потоку радиокаталогов, а также особенностями спектров радиоисточников. Тем не менее для обзоров с высоким угловым разрешением, таких как NVSS и FIRST, проводится массовое отождествление радиоисточников. В работе (McMahon et al., 2002) выполнили отождествление 382892 радиоисточников FIRST (с предельным потоком $S_{1.4\text{ GHz}} > 1$ мЯн) с обзором APM в области около северного галактического полюса (площадь 4150 кв.угл.град). При кросс-идентификации для выделения многокомпонентных источников использовался эмпирический алгоритм, приписывающий вероятность соотношения объектов каталога с одним источником на основании плотности потока и расстояния между компонентами. Оказалось, что при расстоянии между компонентами $< 120''$ имеется $\sim 8\%$ двойных, $\sim 3\%$ тройных и $\sim 1\%$ из 4 или более компонентов. В этом случае число объектов каталога уменьшилось до ~ 306000 , и общая часть отождествлений до предельной звездной величины обзора POSS-I (20.5^m) составила $\sim 24\%$.

Радио и оптические свойства ~ 30000 радиоисточников FIRST, которые совпали по коорди-

натам с объектами SDSS (ERD) ($r^* \sim 22.2^m$), были исследованы в работе (Ivezić et al., 2002). При автоматической кросс-идентификации отождествилось 27% радиоисточников FIRST. Использовалась область поиска радиусом $1.5''$, центрированная на положение оптического объекта. При первом проходе анализировались только источники с ядерной структурой, поскольку алгоритм не позволяет отождествлять радиоисточники более сложной структуры: ядро-выброс (core-jet), ядро с долями (core-lobe) или двойные (double-lobe). Во втором проходе из не отождествившихся с оптическими объектами радиоисточников FIRST были отобраны уникальные пары ближайших соседей (с разделением между парами $r < 90''$), и выполнена повторная кросс-идентификация по положению средней точки между компонентами. При таких условиях оказалось, что радиоисточники более сложной, чем точечная, морфологии составляют $< 10\%$ от общего числа объектов FIRST.

В 1980–1985 гг на радиотелескопе ПАТАН-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 или 3.9 ГГц (Берлин и др., 1981; Берлин и др., 1983). В каталог RC входит 1165 источников по публикациям (Parijskij et al., 1991) и (Бурсов, 1996). Версия каталога в базе данных CATS (Verkhodanov et al., 2004), с которой мы работали, содержит 1209 объектов. С появлением новых обзоров, как в радио, так и в оптике появилась возможность получить дополнительную информацию о радиоисточниках каталога RC. Для изучения выборки радиоисточников каталога RC были выбраны обзоры NVSS (Condon et al., 1998), FIRST (Becker et al., 1997), VLSS (Cohen et al., 2006), TXS (Douglas et al., 1996), GB6 (Gregory et al., 1996), что позволило уточнить координаты, расширить спектральный диапазон и получить информацию о морфологии радиоисточников для последующего оптического отождествления.

Диаграмма направленности радиотелескопа ПАТАН-600 имеет ножевую форму и угловое разрешение по склонению в ~ 3 раза хуже, чем по прямому восхождению (Есепкина и др., 1961; Майорова, Трушкин, 2002). Автоматическая кросс-идентификация каталога RC затруднена из-за того, что широко используемый алгоритм ConeSearch (Simple Cone Search, 2004), который был опробован для этой задачи, использует одинаковый радиус поиска по обеим координатам. В более сложном алгоритме SPECFIND (Vollmer et al., 2005), учитывающем при отождествлении угловое разрешение каталога и спектральные особенности радиоисточников, считается, что диаграмма телескопа имеет одинаковое разрешение по обеим координатам, и координатные ошибки меньше углового разрешения. Эти алгоритмы выдают низкий процент совпадений при кросс-идентификации каталога RC.

Отождествление выборки каталога RC было выполнено при анализе и визуальном просмотре данных с помощью программные средства IVOA: интерактивного атласа неба Aladin (Ochsenbein et al., 2005), Vizier (Ochsenbein et al., 2000) и TOPCAT (Taylor, 2005). Подготовка данных выполнялась автоматически, а затем проводился детальный анализ составных радиооптика изображений с отмеченными объектами из выбранных каталогов для каждого источника. Сначала источники были отождествлены с объектами более точных радиокаталогов, поскольку координатная точность каталога RC недостаточна для оптических отождествлений. В статье описана методика идентификации и приведены результаты отождествления каталога RC с VLSS, TXS, NVSS, FIRST и GB6. Затем, опираясь на уточненные координаты и морфологию радиоисточника, было выполнено оптическое отождествление с SDSS (Adelman-McCarthy et al., 2007).

2. Методика отождествления и уточнение координат источников каталога RC

В связи с появлением в последние годы нескольких радиообзоров, в область которых попала полоса обзора “Холод”, появилась возможность изучить свойства источников каталога RC на частотах 74 и 365 МГц, а также 1.4 и 4.85 ГГц. Предполагалось отождествить все источники

каталога RC, попавшие в область пересечения с обзорами FIRST и SDSS, а именно полосу общей площадью ~ 132 кв.град., включающую по RA(2000) $8^h 11^m - 16^h 25^m$ ($122.75^\circ - 246.25^\circ$) и Dec(2000) $+4^\circ 20' - +5^\circ 24'$ ($4.33^\circ - 5.40^\circ$). Подробное исследование выборки источников с плотностями потоков от $S_{3.9\text{GHz}} \sim 13$ мЯн не проводилось ранее и может представлять определенный интерес, поскольку никакие дополнительные ограничения на морфологию, спектральный индекс, угловые размеры для выборки не использовались.

Ошибки определения координат каталога RC зависят от отклонения источника по высоте Δh от центра диаграммы направленности, а также от плотности потока. Исследование координатных ошибок каталога RC проведено в работе (Соболева, 1992), диаграмма направленности телескопа экспериментально исследовалась в (Майорова, Трушкин, 2002). На рисунках 1 и 2 приведены распределения каталожных ошибок координат по прямому восхождению и склонению для источников, попавших в список. Медианное значение для прямого восхождения — 0.58 сек., для склонения — 38.0".

Для уточнения координат источников каталога RC использовались обзоры NVSS и FIRST. Высокое угловое разрешение обзора FIRST дает подробную информацию о структуре источника, что является необходимым при оптических отождествлениях, но усложняет отождествление в радиодиапазоне. Каталог RC имеет близкое к NVSS угловое разрешение по прямому восхождению. В случаях, когда рядом оказываются несколько объектов FIRST, координаты NVSS соответствуют центру тяжести сложного радиоисточника, что упрощает идентификацию источников RC, поэтому удобно использовать этот обзор в качестве опорного для уточнения координат и сравнения потоков. Поэтому сначала рассматривалось положение источника каталога RC относительно NVSS.

С помощью программного интерфейса атласа неба Aladin для списка источников каталога RC была реализована пакетная подготовка данных из выбранных обзоров и каталогов. Результат запросов для радиоисточника сохранялся в стеке Aladin. Было известно, что ошибки координат в RC (в первую очередь по склонению) могут превосходить каталожные и достигать $\sim 10'$, поэтому размер областей, которые извлекались из обзоров, выбирался порядка $10'$ по обеим координатам (в некоторых случаях $\sim 15'$). Для визуализации расположения относительно друг друга источников из NVSS и FIRST в стеке строились контуры радиоизображений, а также отмечались объекты радиокаталогов. Подготовленный стек просматривался, и измерялось расстояние от источника каталога RC до объекта опорного каталога.

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 $r < 3\sigma$, где σ — каталожная ошибка координат по прямому восхождению, то считаем, что это один объект;
- координатное совпадение по склонению. Расстояние между положением RC и объектом NVSS или FIRST $r < 3\sigma$;
- соотношение величин плотностей потоков для объекта из исследуемого и опорного каталога. Вызывают сомнения случаи, когда при координатном совпадении источник не согласуется по потоку с NVSS (при пересчете потоков полагаем, что спектральный индекс источника $\alpha \sim 0.7$, $S(\nu) \sim \nu^{-\alpha}$);
- наличие в окрестности конкурентов. Рядом с источником каталога RC расположено один, два или несколько объектов опорного каталога. Яркие объекты, расположенные дальше от источника, чем размер диаграммы направленности РАТАН-600, могут повлиять на координатные измерения и внести искажения в величину потока. Группа слабых объектов, попавшая в диаграмму, может повлиять сходным образом.

Уверенно отождествляются радиоисточники, для которых в области поиска ($< 3\sigma$) обнаруживается один объект из каталога NVSS, и плотность потока оценочно соответствует плотно-

сти потока источника NVSS. Особого рассмотрения, обычно с привлечением дополнительной информации из других обзоров, требуют случаи когда:

- в области поиска ($r < 3\sigma$) обнаруживаются два радиоисточника из каталога NVSS;
- в области поиска ($r < 3\sigma$) обнаруживается один радиоисточник из обзора NVSS, который в FIRST разрешается на несколько независимых радиоисточников;
- объект из NVSS, FIRST расположен дальше, чем 3σ от источника RC;
- источник NVSS или FIRST имеет поток, вероятно, слабее пороговой чувствительности каталога RC;
- у источника RC завышенное или заниженное значение плотности потока по сравнению с соседними по частоте измерениями.

Для описания разных случаев отождествления источников каталога RC использовались следующие категории:

a. надежное отождествление. Источник расположен изолированно; расстояние по прямому восхождению и склонению источника каталога RC от NVSS или FIRST $r < 3\sigma$; оцененная по опорному объекту плотность потока источника каталога RC согласуется со значением из каталога NVSS; нет мешающих определению потока и координат соседних источников.

b. вероятное отождествление. Рассматриваются те же условия, что и в случае “а”, но расстояние между сравниваемыми объектами каталогов, превышает $r > 3\sigma$ по склонению, но совпадает по прямому восхождению, потоки согласуются;

c. возможное отождествление. К этой категории относятся источники, у которых:

– расстояние между сравниваемыми объектами каталогов, превышает $r > 3\sigma$ по склонению, но совпадает по прямому восхождению. Несогласование потоков объясняется присутствием близких соседних объектов из опорных каталогов, которые могут интегрироваться диаграммой направленности РАТАН-600;

– расстояние между сравниваемыми объектами каталогов немного превышает $r > 3\sigma$ по склонению и прямому восхождению, но потоки согласованы;

d. маловероятное отождествление. Значительное отклонение по координатам, или нереальное значение плотности потока по сравнению с опорными каталогами, или сложно соотнести источник с группой объектов из опорного каталога;

e. нет отождествления с объектами других каталогов.

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 (Parijskij et al., 1991). При кросс-идентификации с другими каталогами можно определить правильный вариант и удалить из списка объект-близнец.

В результирующих отождествлениях, чтобы разрешить неоднозначности в описанных выше случаях “b”, “c” и “d”, а также учесть влияние ярких источников или группы близких источников, использовался атлас, отображающий полосу обзора “Холод”. На рисунках областей, размерами 15 минут по прямому восхождению, а по склонению - заведомо включающих источники каталога, (см. рис. 3) нанесена центральная часть обзора с разметкой каталожных ошибок источников по координатам, а также положениями и потоками радиоисточников из VLSS, NVSS, TXS, GB6, PMN и других каталогов (Копылов, 2007).

В каталоги обычно включаются объекты с плотностью потока выше 5σ уровня отношения сигнал-шум. Информацию о возможном наличии более слабого источника можно получить из радиоизображений обзоров. Так в каталоге GB6 указывается предельная чувствительность по плотности потока $S_{4.85\text{GHz}} \sim 18$ мЯн. Источники с плотностью потока на уровне $3 - 4\sigma$,

отсутствующие в каталоге, можно выделить при визуальном просмотре изображений обзора GB6, что в сомнительных случаях помогает при отождествлении.

После просмотра стеков и атласа радиоисточники каталога RC были разделены на три группы:

- “RC” — источник уверенно отождествляется и в большинстве случаев присутствует, кроме RC, NVSS и FIRST, еще, по крайней мере, в одном из каталогов VLSS, TXS, GB6;
- “rc” источник отождествляется с NVSS и/или FIRST;
- “X” — не удалось установить однозначного соответствия источника из каталога RC с другими каталогами. Объекты, отнесенные к этой группе, исключены из дальнейшего рассмотрения.

Для источников из групп “RC” и “rc” были уточнены координаты по опорному каталогу NVSS, которые затем использовались при окончательной выборке данных из каталогов. Координаты изменялись следующим образом:

- если источник каталога RC соотносится с одним объектом NVSS, то используются координаты NVSS;
- радиоисточник отождествляется с двойным объектом из каталога NVSS, то используются координаты средней точки между двумя компонентами;
- радиоисточник отождествляется с тройным объектом из каталога NVSS, то используются координаты центрального компонента;
- радиоисточник отождествляется с группой объектов NVSS, то используются координаты самого яркого объекта, как оказывающего основной вклад в источник каталога RC.

На рисунках 4 и 5 для источников выборки, отождествленных с NVSS, показано распределение разности координат двух каталогов. Медианное значение разности координат RC и NVSS составляет по прямому восхождению $+0.14$ сек. ($2.1''$), по склонению $+10.8''$.

Из 432 радиоисточников каталога RC, попавших в область пересечения с SDSS и FIRST, к группе “RC” было отнесено 190 (44%) источников, к “rc” — 130 (30%), “X” — 98 (23%) и 14 (3%) “twin” объектов. Далее рассматривались 320 радиоисточников, относящихся к “RC” и “rc”.

3. Результаты отождествления источников каталога RC с объектами радиокаталогов FIRST, NVSS, TXS, VLSS и GB6

В центральной части обзора “Холод” каталог RC имеет полноту близкую к единице для радиоисточников с плотностью потока $S_{3.9\text{GHz}} > 15$ мЯн (Соболева, 1992). К этой области относится полоса шириной по склонению $10'$, центрированная на склонение источника SS 433 на эпоху проведения обзора. На рисунке 6 показан подсчет числа источников по плотности потока. Завал для слабых источников начинается для $S_{3.9\text{GHz}} > 12$ мЯн. В 20-минутной полосе объекты с плотностью потока $S_{3.9\text{GHz}} > 29$ мЯн представлены в каталоге без пропусков (см. рис. 7). При формировании двух ограниченных по плотности потока выборок использовались значения разности склонения SS 433 и уточненных по NVSS координат радиоисточника, пересчитанных на эпоху наблюдений “Холода” (1981). Одна полная выборка включает источники с отклонением по высоте от центра диаграммы $\Delta H \leq |5'|$ и плотностью потока $S_{3.9\text{GHz}} > 12$ мЯн. Площадь, занимаемая выборкой, составляет ~ 21 кв.град. Во вторую выборку вошли источники с $\Delta H \leq |10'|$ и $S_{3.9\text{GHz}} > 29$ мЯн (площадь ~ 41 кв.град.). В первую выборку попало 131 объект, во вторую — 112. Выборки частично перекрываются по объектам. Далее приведены результаты, которые относятся к анализу свойств радиоисточникам этих двух выборок. Для краткости первую выборку дальше в тексте будем обозначать “1S”, вторую — “2S”.

На рисунках 8, 9, 10 и 11 представлены распределения плотностей потоков для обеих выборок на частотах 74 МГц (VLSS), 365 МГц (TXS), 1.4 ГГц (NVSS), 4.85 ГГц (GB6). Мы не

Таблица 1: Соотношение радиоисточников по типу спектра (по значению спектрального индекса $\alpha_{1.4-4.85\text{ GHz}}$) в выборках 1S ($\Delta H = \pm 5'$ и $S_{3.9\text{ GHz}} > 12\text{ мЯн}$) и 2S ($\Delta H = \pm 10'$ и $S_{3.9\text{ GHz}} > 29\text{ мЯн}$)

Спектр	Выборка	Доля	N_{obj}	$LAS_{median}('')$
I	1S	9%	11	2.19
	2S	6%	7	2.33
F	1S	24%	31	1.82
	2S	21%	23	1.94
S	1S	55%	73	9.7
	2S	53%	60	23.55
U	1S	12%	16	20.35
	2S	20%	22	15.45

рассматривали плотности потока источников на частоте 3.9 ГГц, поскольку не проводили пересчет плотностей потока по уточненным координатам.

В этих выборках для источников, которых нет в каталоге GB6, просмотрены области изображений обзора GB6. Если на них уверенно обнаруживались объекты выше уровня фона, но отсутствовавшие в каталоге GB6, то значение плотности соответствующих источников каталога RC оценивалось в $S_{4.85\text{ GHz}} < 18\text{ мЯн}$. Когда источники не обнаруживались на изображениях обзора GB6, качественно сравнивались потоки NVSS и RC. Мы воспользовались этими оценками для вычисления спектрального индекса на частотах 1.4–4.85 ГГц для слабых источников, которых нет в каталоге GB6. Из 131 источника выборки 1S 54 источника отождествились с каталогом GB6, 61 объект определяются на изображениях обзора GB6 и 16 не найдены ни в каталоге, ни в обзоре, для выборки 2S соответственно — 85, 26 и 1.

Медианное значение плотностей потока выборки 1S составляет на 74 МГц — 1449 мЯн (28% объектов имеется в каталоге VLSS), 365 МГц — 497 мЯн (31% в TXS), 1.4 ГГц — 49.2 мЯн, 3.9 ГГц — 27 мЯн, 4.85 ГГц — <18 мЯн (88% в GB6 с учетом объектов, у которых имеются оценки потоков по изображениям обзора GB6) или 55 мЯн (41% только по данным каталога GB6) и, соответственно, для выборки 2S: 74 МГц — 1461 мЯн (51%), 365 МГц — 528 мЯн (55%), 1.4 ГГц — 120.3 мЯн, 3.9 ГГц — 57 мЯн, 4.85 ГГц — 53 мЯн (99% с учетом оценки потоков по обзору GB6) или 63 мЯн (56% по данным каталога GB6).

Угловые размеры определялись в зависимости от структуры источника, для чего по форме контуров изображения из обзора FIRST, а также угловым размерам составляющих объектов принималось решение, являются ли они компонентами или независимыми радиоисточниками. Если источник каталога RC отождествлялся с одним объектом, то за угловой размер принимался размер большой оси, указанный в каталоге FIRST. Для источников, состоящих из двух и более компонентов, угловой размер определялся по измерениям с помощью Aladin как расстояние между двумя самыми разнесенными объектами каталога FIRST.

Определив спектральный индекс $\alpha_{1.4-4.85\text{ GHz}}$, мы разбили источники на четыре группы и отнесли к инверсным I с $\alpha < -0.1$, к плоским F с $0.1 \leq \alpha < 0.5$, крутым S с $0.5 \leq \alpha < 1$ и ультра крутым U — с $\alpha \geq 1$. Значения $\alpha_{1.4-4.85\text{ GHz}}$ для радиоисточников двух выборок представлены в табл. 1.

Из сравнения двух выборок, первая из которых слабее второй, если судить по медианному значению плотности потока 1S — $S_{3.9\text{ GHz}} = 27\text{ мЯн}$ и 2S — $S_{3.9\text{ GHz}} = 57\text{ мЯн}$, получается, что в диапазоне 1.4 – 4.85 ГГц с уменьшением плотности потока число источников с инверсными и плоскими спектрами немного увеличивается, то есть в 1S — I+F=33%, а в 2S — I+F=27%. Число

Таблица 2: Поведение спектральных индексов $\alpha_{74-365 \text{ MHz}}$, $\alpha_{365 \text{ MHz}-1.4 \text{ GHz}}$, $\alpha_{1.4-4.85 \text{ GHz}}$ радиоисточников двух выборок

Спектр	Выборка 1S ($\Delta H = \pm 5'$, $S_{3.9 \text{ GHz}} > 12 \text{ мЯн}$) 48 источников	Выборка 2S ($\Delta H = \pm 10'$, $S_{3.9 \text{ GHz}} > 29 \text{ мЯн}$) 70 источников
IS — форма спектра меняется от инверсной на низких частотах к крутому на более высоких частотах	2% “IS-” — 2%	4% “IS-” — 3% “IS+” ~ 1%
FS — изменение спектра от плоского на низких частотах к крутому на более высоких. “-” спектральный индекс уменьшается, “+” — увеличивается	23% “FS” — 2% “S-” — 15% “FS+” — 6%	20% “FS” — 4% “FS-” — 10% “FS+” — 6%
S — крутой или ультра крутой спектр в диапазоне 74–365 МГц, который становится более крутым или наоборот спектральный индекс уменьшается к высоким частотам	69% “S” — 6% “S+” — 25% “S++” — 4% “S+-” — 19% “S-” — 15%	66% “S” — 7% “S+” — 23% “S++” — 9% “S+-” — 17% “S-” — 9% “S-+” — 1%
SF — на низких частотах спектр крутой, с повышением частоты, переходящий в плоский, инверсный или крутой	6% “SF” — 4% “SF-” — 2%	10% “SF” — 6% “SF-” ~ 1% “SI-” ~ 1% “SFS” ~ 1%

источников с крутыми и ультра крутыми спектрами уменьшается, а именно: 1S — S+U=67%, 2S — S+U=73%. Максимум распределения для выборки 2S смещен относительно выборки 1S в сторону более крутых спектральных индексов. Распределение спектрального индекса $\alpha_{1.4-4.85 \text{ GHz}}$ для двух выборок приведено на рисунке 12.

Источники с плоскими и инверсными спектрами в выборках 1S и 2S оказались более компактными по угловым размерам, чем источники с крутыми и ультра крутыми спектрами.

Источники, отождествившиеся в трех или четырех каталогах VLSS, TXS, NVSS и GB6, имеют дополнительную информацию по плотностям потока, которую можно использовать для сравнения поведения радиоспектров на 3–4 частотах. Мы вычислили двухчастотные спектральные индексы $\alpha_{74-365 \text{ MHz}}$, $\alpha_{365 \text{ MHz}-1.4 \text{ GHz}}$, $\alpha_{1.4-4.85 \text{ GHz}}$ и символами I, F, S, U обозначили соответствующие области спектра, отмечая увеличение спектрального индекса — “+”, уменьшение — “-” при переходе от участка к участку. В выборке 1S таких источников оказалось 48, включая 8, у которых имеется верхняя оценка плотности потока на 4,85 ГГц по изображениям обзора GB6, в 2S — 70 и 8 соответственно.

Поведение спектров можно разделить на следующие типы: спектры, которые на низких частотах 74–365 МГц, являются инверсными, а затем меняют свой наклон, аналогично — плоские, меняющиеся от низких частот к высоким, а также — крутые и ультра крутые. В таблице 2 приведена более подробная разбивка радиоисточников по группам. Медианная плотность потока источников, поведение спектра которых можно проследить на 3–4 частотах, для выборки 1S оказалась $S_{1.4 \text{ GHz}} = 159 \text{ мЯн}$, $S_{3.9 \text{ GHz}} = 50 \text{ мЯн}$, для 2S — $S_{1.4 \text{ GHz}} = 186 \text{ мЯн}$, $S_{3.9 \text{ GHz}} = 54 \text{ мЯн}$, то есть, они мало отличаются.

Таблица 3: Распределение по количеству компонентов в радиоисточниках и угловые размеры в выборке 1S ($\Delta H = \pm 5'$ и $S_{3.9\text{ GHz}} > 12$ мЯн), 2S ($\Delta H = \pm 10'$ и $S_{3.9\text{ GHz}} > 29$ мЯн) и во всей выборке из 318 радиоисточников (S)

Число компонентов	Выборка	Доля в выборке	Число объектов	LAS_med (arcsec)
1	1S	56%	73	1.84
	2S	50%	56	1.89
	S	55%	176	1.83
2	1S	26%	34	19.8
	2S	33%	37	17.3
	S	27%	85	17.5
3	1S	12%	16	34
	2S	10%	11	29.7
	S	11%	36	33.4
4	1S	4%	5	44.5
	2S	3.5%	4	42.7
	S	4%	14	60
≥ 5	1S	2%	3	99
	2S	3.5%	4	96.5
	S	2%	7	94

Мы выделили 4 группы спектров:

- IS – спектр меняется от инверсного на низких частотах к крутому на более высоких частотах;
- FS – изменение спектра от плоского на низких частотах к крутому на более высоких частотах;
- S – крутой или ультра крутой спектр в диапазоне 74 – 365 МГц, который становится более крутым с увеличением частоты или, наоборот, спектральный индекс уменьшается к высоким частотам;
- SF – крутой спектр на низких частотах с увеличением частоты становящийся плоским или инверсным.

Спектры инверсные на низких частотах, становящиеся крутыми к высоким, редко встречаются ($IS \sim 3\%$), хотя у самой далекой из известных радиогалактик с $Z=5.199$ (van Breugel et al., 1999) спектральный индекс меняется подобным образом. Спектров крутых, становящихся плоскими к высоким частотам, также немного ($SF \sim 8\%$). Большая часть имеет крутой спектр с незначительным увеличением или уменьшением спектрального индекса к более высоким частотам ($S \sim 70\%$). Спектров плоских в диапазоне 74 – 365 МГц и становящихся крутыми к 1.4 – 4.85 ГГц достаточно много ($FS \sim 20\%$).

В статье (Ivezić et al., 2002) приведено соотношение однокомпонентных и многокомпонентных источников в обзоре FIRST, и, оказывается, что более 90% радиоисточников являются однокомпонентными, и 10% имеют несколько компонентов. Похожий результат приводится в работе (McMahon et al., 2002) при отождествлении FIRST и APM. В этом случае число двойных источников оценивается $\sim 8\%$, тройных $\sim 3\%$, групп из 4-х компонентов и более $\sim 1\%$. В (Ivezić et al., 2002) и (McMahon et al., 2002) оценки делались по результатам автоматической кросс-идентификации каталога FIRST с оптическим обзором по большому числу источников.

Для нашей сравнительно небольшой выборки у нас имелась возможность просмотреть каждый источник. Чтобы объединить объекты в один источник или наоборот разнести их в от-

дельные независимые источники, дополнительно разрисовывали область обзора с помощью сервиса, строящего контуры радиоизображений FIRST без потери углового разрешения (http://www.mrao.cam.ac.uk//surveys/FIRST/postage_first_contour_newed.html). Мы определили соотношение однокомпонентных и многокомпонентных радиоисточников для 320 объектов. В таблице 3 приведено процентное соотношение источников и угловые размеры для выборок 1S, 2S и всей выборки S (в расчет вошли 318 источников, два слабых протяженных источника отсутствуют в FIRST). Число однокомпонентных источников немного больше в выборке 1S, двухкомпонентных источников немного больше во выборке 2S. Если подсчитать число объектов каталога FIRST и сравнить с числом реальных радиоисточников в наших выборках, то получим соотношение 5:3, то есть на 5 объектов приходится 3 радиоисточника, так можно оценить число радиоисточников в каталоге FIRST ~ 470000 .

Однокомпонентных источников оказалось $\sim 55\%$, двухкомпонентных $\sim 30\%$, трехкомпонентных $\sim 10\%$ и с большим числом компонентов — $\sim 5\%$. Однокомпонентных источников оказалось меньше в сравнении со значениями, указанными в приведенных выше работах, хотя в (Cress et al., 1996) оценивают их долю в $\sim 60\%$, что ближе к нашим результатам. Доля радиоисточников, которые сложно отождествить программными средствами, составляет $\sim 15\%$ (для каталога с угловым разрешением $< 5''$, таким как у FIRST).

В работе (Lawrence et al., 1986) приводится морфологическая классификация радиоисточников для 5ГГц MIT-Green Bank (MG) обзора. Она включает 10 типов:

1. point — точечный, не разрешающийся на компоненты радиоисточник;
2. quasi-point — доминирует точечное ядро со слабовыраженной структурой;
3. diffuse — разрешаемый источник с 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 — двухсторонние относительно симметричные джеты, иногда с определяемым ядром, без других компактных областей.

Взяв за основу эту классификацию, мы внесли в нее некоторые изменения, связанные с использованием FIRST при оптических отождествлениях, то есть с тем, что необходимо было связать положение родительской галактики со структурой радиоисточника, затем применили эту схему для морфологической классификации радиоисточников выборки. Приведем описание морфологических типов:

1. core (C) — ядерный источник. Пик не разрешается, небольшие угловые размеры ($\sim 2''$), оптический объект совпадает с максимумом плотности потока в радиодиапазоне;
2. core-jet (CJ) — не разрешающийся пик с продолжением в одну сторону или с близким слабым протяженным компонентом, оптический объект совпадает с максимумом плотности потока в радиодиапазоне;
3. core-lobe (CL) — источник с ядром и со спадающей к краям яркостью в компонентах, оптический объект совпадает с максимумом плотности потока в радиодиапазоне;
4. double (D) — двухкомпонентный радиоисточник с выраженной ориентацией компонентов по одной оси, яркость которых больше к краям (FR II), оптический объект расположен между радиокомпонентами;

Таблица 4: Распределение радиоисточников по морфологическому типу в выборке 1S ($\Delta H = \pm 5'$ и $S_{3.9\text{ GHz}} > 12$ мЯн) и 2S ($\Delta H = \pm 10'$ и $S_{3.9\text{ GHz}} > 29$ мЯн) и для 318 радиоисточников

Тип	Выборка	Доля в выборке	Число объектов	LAS_med (arcsec)	Спектр Спектр
C (core)	1S	37%	49	1.56	I-14%; F-41%; S-43%; U-2%
	2S	36%	43	1.39	I-10%; F-33%; S-45%; U-12%
	S	40%	126	1.43	–
CL (core-lobe)	1S	5%	7	19.8	I-14%; S-86%
	2S	4%	5	3.36	I-20%; F-20%; S-60%
	S	6%	18	11.6	–
CJ (core-jet)	1S	9%	12	4.87	I-8%; F-33%; S-59%
	2S	5%	6	11.52	F-33%; S-67%
	S	7%	23	7.27	–
DC (double core)	1S	7%	9	80	F-22%; S-67%; U-11%
	2S	8%	9	44.5	F-11%; S-56%; U-33%
	S	6%	19	49.8	–
D (double)	1S	31%	41	12.1	I-5%; F-7%; S-68%; U-20%
	2S	39%	44	15.8	I-5%; F-7%; S-61%; U-27%
	S	33%	106	13.7	–
T (triple)	1S	8%	10	35.15	S-50%; U-50%
	2S	4%	5	27	F-40%; S-40%; U-10%
	S	6%	20	34.3	–
DD (double-double)	1S	1%	1	74	S
	2S	–	–	–	–
	S	1%	4	46.2	–
M (multiple)	1S	1.5%	2	–	F; U
	2S	1%	1	17.1	U
x (X-shaped?)	1S	5%	6	–	–
	2S	10%	11	–	–
n (близкий сосед)	1S	15%	19	–	–
	2S	13%	14	–	–

5. double-core (DC) — похож на D с наличием слабого ядра), оптический объект совпадает со слабым ядром;

6. double-double (DD) — похож на D, но компоненты двойные), оптический объект расположен между радиокомпонентами;

7. triple (T) — тройной источник с ярким центральным компонентом, оптический объект совпадает с центральным компонентом;

8. multiple (M) — многокомпонентный источник, не соотносящийся с перечисленными случаями по структуре, для оптического отождествления требуется дополнительная информация;

9. extended (E) — протяженный источник (может отсутствовать в FIRST, хотя определяется в NVSS), для оптического отождествления требуется дополнительная информация.

В таблице 4 приведено распределение радиоисточников по морфологическому типу (для 1S, 2S и всей выборки) с указанием числа объектов и процентной доли по отношению к числу источников в выборке, медианного значения углового размера и типа спектра по спектральному индексу $\alpha_{1.4-4.85\text{ GHz}}$ для каждой группы.

Радиоисточники с асимметричной структурой, так называемые “winged” или “X-shaped”

(см. рис. 13), являются небольшой и интересной популяцией радиогалактик (Cheung, 2007). В добавлении к обычной паре радиокомпонентов у этих объектов имеется пара излучающих областей с низкой поверхностной яркостью, которые образуют крылья или X-образную форму радиоисточника. Предположительно эта форма является результатом обратного истечения плазмы из областей горячих пятен в неоднородную среду, окружающую радиоисточник (Leahy, Williamse, 1984). Второе объяснение необычной структуры источника связывают с тем, что слабые по яркости области могут быть остаточными явлениями быстрой смены ориентации системы супермассивной черной дыры (SMBH) и аккреционного диска, произошедшей из-за относительно недавнего мерджинга двойной SMBH (Dennett-Thrope et al., 2002). X-shaped источники интересны как наблюдаемые системы, связываемые с двойными черными дырами (Komossa, 2003) и повторяющимися фазами активности радиоисточника в родительской галактике (Liu, 2004). Мы подсчитали количество радиоисточников со структурой похожей на “winged” или “X-shaped” (см. рис. 13, 14). Они составляют 5–10% от общего числа источников в первой и второй выборках.

Достаточно часто рядом с радиоисточником обнаруживается соседний источник на угловом расстоянии $< 1 - 1.5'$, возможно образующий с ним группу, что также может относиться к проявлению совместной активности. Таких случаев оказалось $> 10\%$. Они в таблице отмечены символом “n”. Пример такой группы приведен на рисунках 15 и 16.

Результаты отождествления радиоисточников с VLSS, TXS, NVSS, FIRST, GB6, угловые размеры, морфология, спектральные индексы представлены в электронном виде в таблице, которая доступна по адресу <http://www.sao.ru/hq/zhe/>. Там же имеется описание колонок таблицы и контурные карты радиоисточников каталога RC, построенные по обзору FIRST, в формате PostScript.

4. Заключение

Для 432 радиоисточников каталога RC, попадающих в область пересечения с обзорами SDSS и FIRST, проведена идентификация с радиокаталогами FIRST, NVSS, TXS, VLSS и GB6. В статистике и оптическом отождествлении использовались источники ($\sim 75\%$ от общего числа), которые отождествились с каталогами NVSS и/или FIRST. Для исследования оставшейся части радиоисточников необходима дополнительная, уточняющая координаты информация.

По данным обзора FIRST подсчитано число компонентов (входов в каталог FIRST) для исследуемых источников. Оказалось, что однокомпонентные источники составляют $\sim 55\%$ выборки, двухкомпонентные и более — 45%. Этот результат не совпадает с результатами автоматического кросс-матчинга FIRST с SDSS и APM (McMahon et al., 2002; Ivezić et al., 2002), но совпадает с оценкой (60%) однокомпонентных источников в обзоре FIRST, приведенной в работе (Cress et al., 1996). Для нашей выборки получилось, что на 5 объектов каталога FIRST приходится три радиоисточника.

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 (Соболева, 1992). 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 $S_{3.9\text{GHz}} > 12$ мЯн. Площадь, занимаемая выборкой, составляет ~ 21 кв.град. Во вторую выборку вошли источники с $\Delta H \leq |10'|$ и $S_{3.9\text{GHz}} > 29$ мЯн (площадь ~ 41 кв.град.). В первую выборку 1S попало 131 объект, во вторую выборку 2S — 112. Выборки частично перекрываются по объектам.

Определив спектральный индекс $\alpha_{1.4-4.85\text{GHz}}$ для всех источников в этих выборках, мы разбили их на четыре группы и отнесли к инверсным I с $\alpha < -0.1$, к плоским F с $0.1 \leq \alpha < 0.5$, к крутым S с $0.5 \leq \alpha < 1$ и ультра крутым U — с $\alpha \geq 1$. Из 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, то есть в 1S — I+F=33%, а в 2S — I+F=27%. Число источников с крутыми и ультра крутыми спектрами уменьшается, а именно: 1S — S+U=67%, 2S — S+U=73%. Максимум распределения для выборки 2S смещен относительно выборки 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 ультра крутыми спектрами.

Источники, отождествившиеся в каталогах VLSS, TXS, NVSS и GB6, имеют дополнительную информацию по плотностям потока, которую можно использовать для сравнения поведения радиоспектров на 3–4 частотах. Мы вычислили двухчастотные спектральные индексы $\alpha_{74-365\text{ MHz}}$, $\alpha_{365\text{ MHz}-1.4\text{ GHz}}$, $\alpha_{1.4-4.85\text{ GHz}}$ и выделили 4 группы спектров:

- IS – спектр меняется от инверсного на низких частотах к крутому на более высоких частотах;
- FS – изменение спектра от плоского на низких частотах к крутому на более высоких частотах;
- S – крутой или ультра крутой спектр в диапазоне 74 – 365 МГц, который становится более крутым с увеличением частоты или, наоборот, спектральный индекс уменьшается к высоким частотам;
- SF – крутой спектр на низких частотах с увеличением частоты становящийся плоским или инверсным.

Спектры инверсные на низких частотах, становящиеся крутыми к высоким, редко встречаются ($IS \sim 3\%$). Спектров крутых, становящихся плоскими к высоким частотам, также немного ($SF \sim 8\%$). Большая часть источников имеет крутой спектр с незначительным увеличением или уменьшением спектрального индекса к более высоким частотам ($S \sim 70\%$) или плоский спектр в диапазоне 74 – 365 МГц, становящийся крутым к 1.4 – 4.85 ГГц ($FS \sim 20\%$).

Для дальнейшего оптического отождествления особое внимание уделялось морфологической структуре радиоисточников. Источники классифицированы по морфологической схеме, в основе которой лежит соотнесение структуры радиоисточника и положения оптического объекта. 49% источников отнесены по типу к ядерным (C core), 27% — ядро с компонентами (CL — core-lobe), 5% — ядро с выбросом (CJ core-jet) и 34% — двойные и двойные с ядром (D — double-lobe и DC — double-core-lobe). По уточненным координатам 75% радиоисточников выборки выполнено оптическое отождествление с обзором SDSS, результаты которого приводятся в следующей статье. Оказывается, что для ядерных источников (C) у 24% объектов не обнаружен оптический кандидат, CJ — 25%. Они отождествляются хуже, чем CL(4%) и D(14%).

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).

Список литературы

- Адельман-Маккартни (Adelman-McCarthy, J. K. et al.), VizieR On-line Data Catalog: II/276 (2007)
 Бекер и др. (Becker R.H., et al.), ApJ, 475, 479 (1997)
 Берлин А.Б. и др., ПАЖ, 7, 290 (1981)
 Берлин А.Б. и др., ПАЖ, 9, 211 (1983)
 Бурсов Н.Н., АЖ, 73, 1 (1996)
 Ван Брейгель и др. (van Breugel, W. et al.), 1999, ApJ, 518, L61-L64
 Верходанов и др. (Verkhodanov O. V. et al.), Toward an International Virtual Observatory, ESO ASTROPHYSICS SYMPOSIA, 316 (2004)

- Волмер и др. (Vollmer B. et al.), A&A, 436, 757-762, (2005)
Грегори и др. (Gregory, P. C et al.), ApJS, 103, 427 (1996)
Дене-Торп и др. (Dennett-Thorpe, J. et al., MNRAS, 330, 609 (2002)
Дуглас и др. (Douglas J.N., et al.), AJ, 111, 1945(1996)
Есепкина Н. А. и др., Радиотехника и электроника, 6, ?12, 1947 (1961)
Ивезич и др. (Ivezić, Ž. et al.), AJ, 124, 2364 (2002)
Комосса (Komossa, S.), AIP Conf. Proc., 686, 161 (2003)
Кондон и др. (Condon J.J. et al.), AJ, 115, 1693 (1998)
Копылов А.И., <http://www.sao.ru/hq/zhe> (2007)
Кохен и др. (Cohen, A. S et al.), Astronomische Nachrichten, 327, 262 (2006)
Кресс и др. (Cress, C. M. et al.), AJ, 473, 7 (1996)
Личи и Вилиамс (Leahy, J. P. &Williams, A. G.), MNRAS, 210, 92 (1984)
Лоуренс и др. (Lawrence, C.R. et al.), ApJS, 61, 105 (1986)
Лю (Liu, F. K.), MNRAS, 347, 1357 (2004)
Майорова Е.К., Грушкин С.А. Бюлл.САО, 54, 89 (2002)
МакМахон и др. (McMahon, R. G et al.), ApJS, 143, 1 (2002)
Оксенбайн и др. (Ochsenbein, F et al.), ADASS XIV ASP Conf. Series, 347, 193 (2005)
Оксенбайн и др. (Ochsenbein, F. et al.), A&AS, 143, 23 (2000)
Парийский и др. (Pariiskij, Yu. N. et al.), A&AS, 87, 1 (1991)
Симпл (Simple Cone Search. NVO compliance.), <http://us-vo.org/pubs/files/conesearch.html> (2004)
Соболева Н.С., автореферат, УДК 523.164, СПб, 47с. (1992)
Тейлор (Taylor, M. B.), ASP Conf. Series, 347, 29 (2005)
Чунг (Cheung, C.C.), AJ, 133, 2097 (2007)

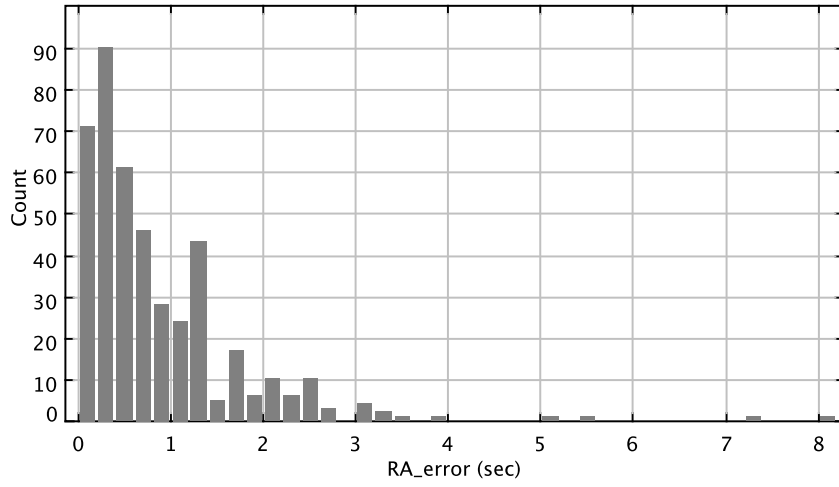


Рис. 1: Распределение координатных ошибок по прямому восхождению каталога RC в области, пересекающейся с SDSS и FIRST

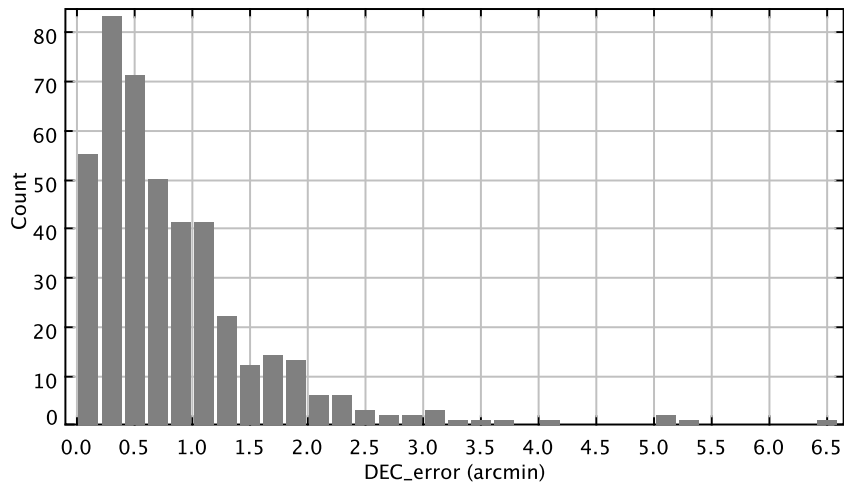


Рис. 2: Распределение координатных ошибок по склонению каталога RC в области, пересекающейся с SDSS и FIRST

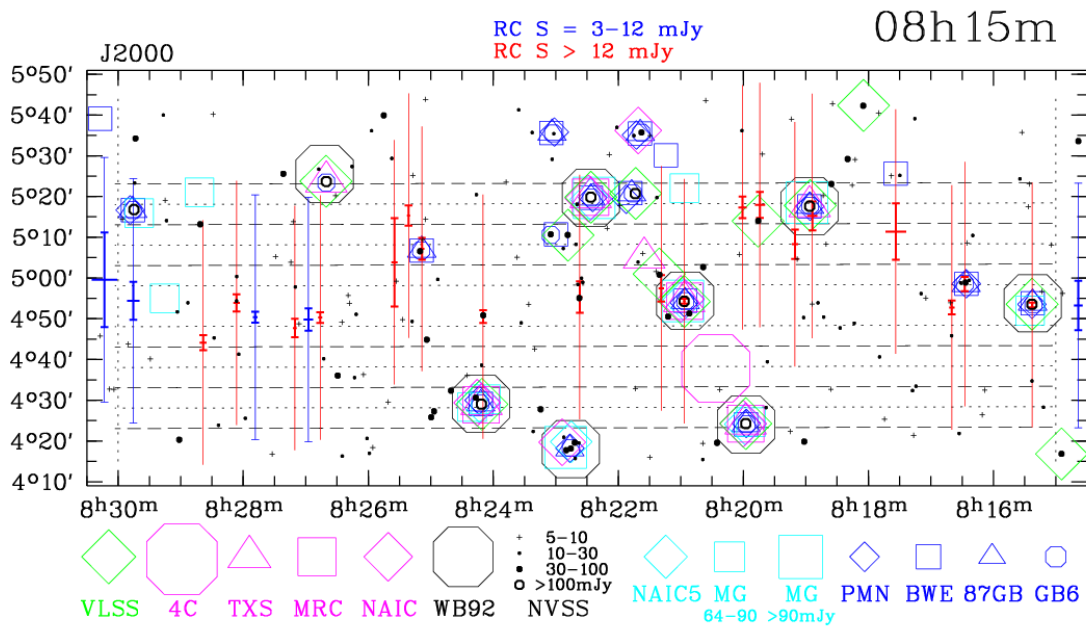


Рис. 3: Область обзора “Холод” с нанесенными положениями радиокаталогов. Для всех объектов каталога RC показаны ошибки координат $\pm 3\sigma$.

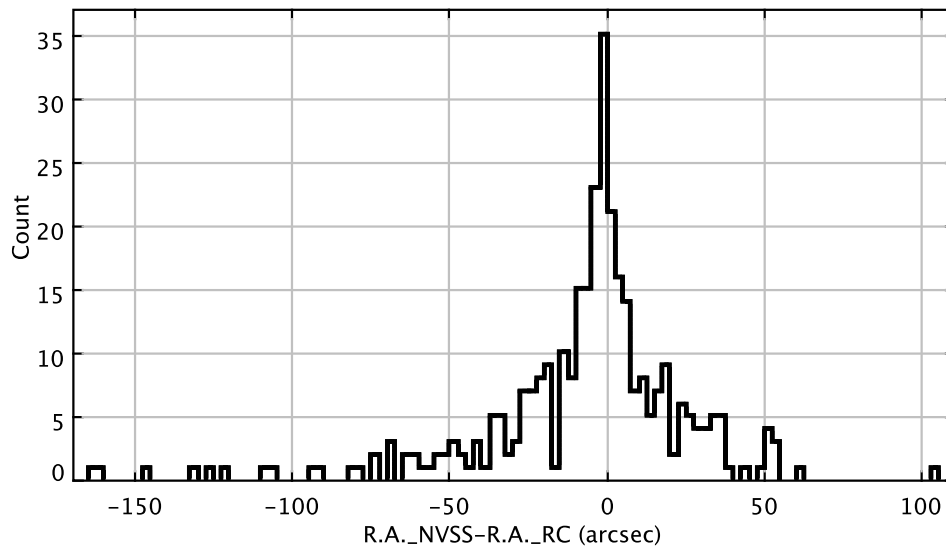


Рис. 4: Распределение разности координат (по прямому восхождению) источников каталога RC, отождествленных с NVSS.

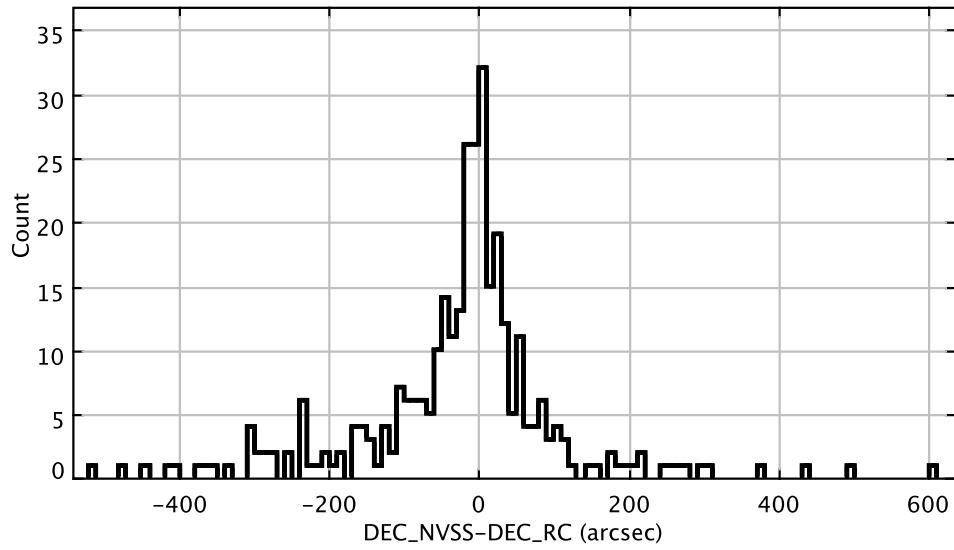


Рис. 5: Распределение разности координат (по склонению) источников каталога RC, отождествленных с NVSS.

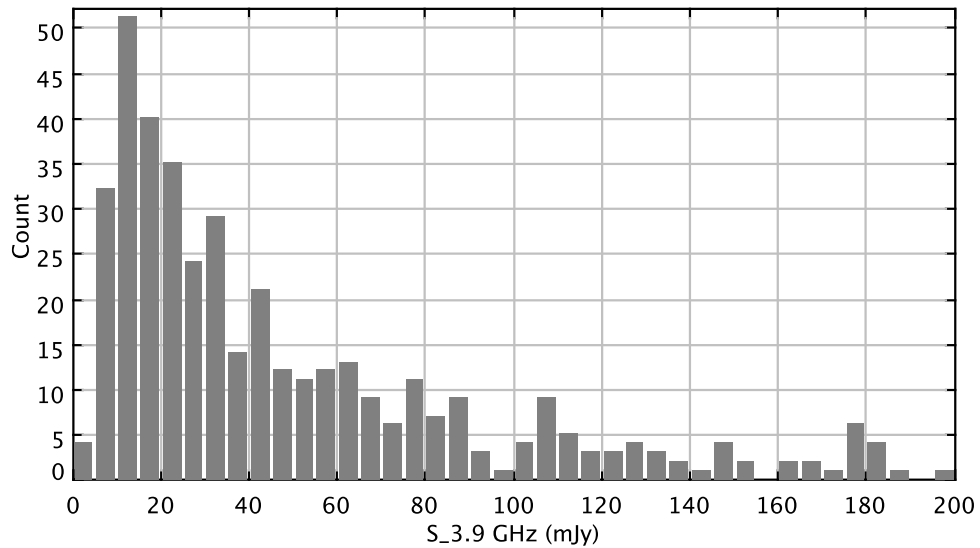


Рис. 6: Дифференциальный подсчет источников каталога RC (источники ярче 200 мЯн не нанесены на график).

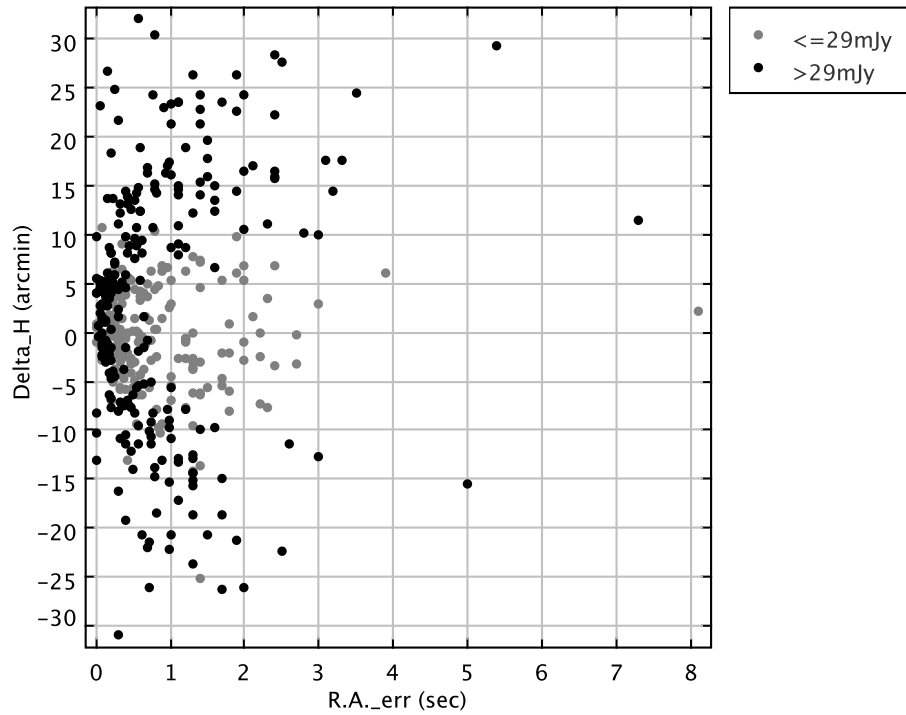


Рис. 7: Распределение ошибок определения координат по прямому восхождению в зависимости от каталожного расстояния ΔH от центра диаграммы направленности. Черными точками обозначены источники с $S_{3.9GHz} > 29$ мЯн, серыми – $S_{3.9GHz} \leq 29$ мЯн.

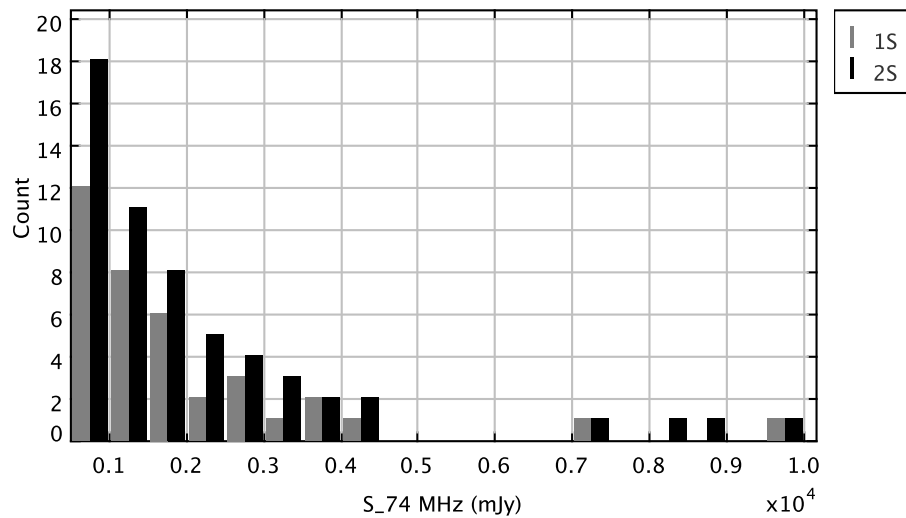


Рис. 8: Распределение плотностей потоков для выборок 1S (серый цвет) и 2S (черный цвет) на частоте 74 МГц (VLSS).

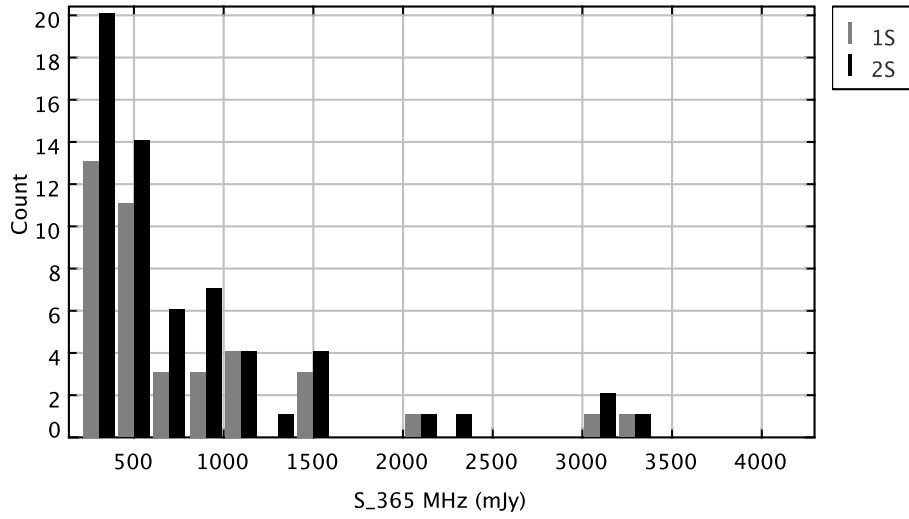


Рис. 9: Распределение плотностей потоков для выборок 1S (серый цвет) и 2S (черный цвет) на частоте 365 МГц (TXS).

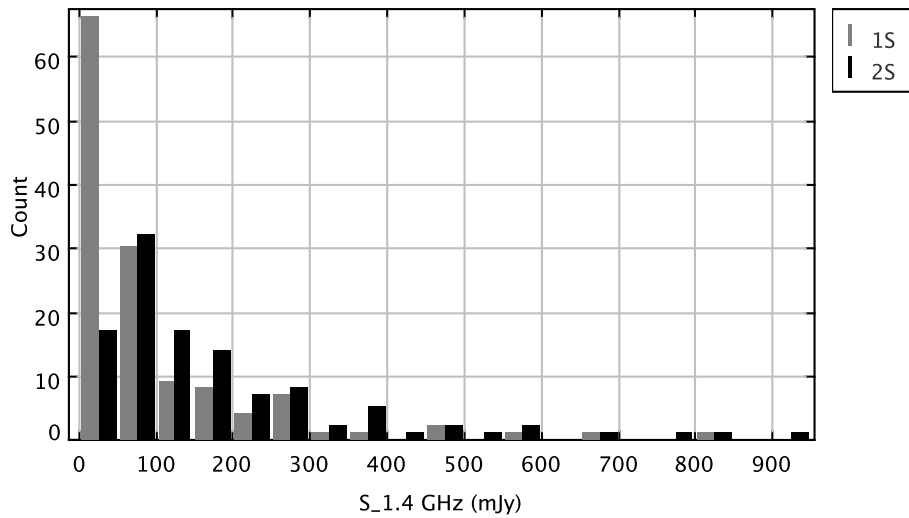


Рис. 10: Распределение плотностей потоков для выборок 1S (серый цвет) и 2S (черный цвет) на частоте 1400 МГц (NVSS).

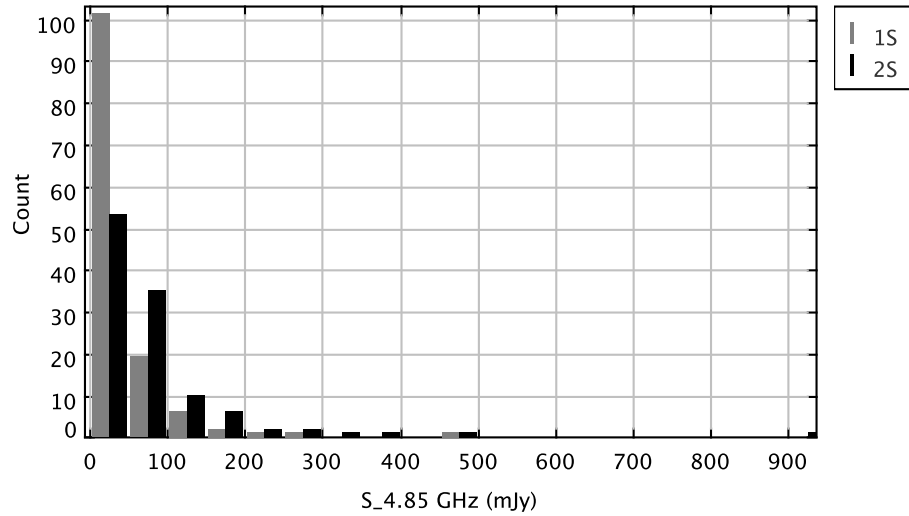


Рис. 11: Распределение плотностей потоков для выборок 1S (серый цвет) и 2S (черный цвет) на частоте 4850 МГц (GB6).

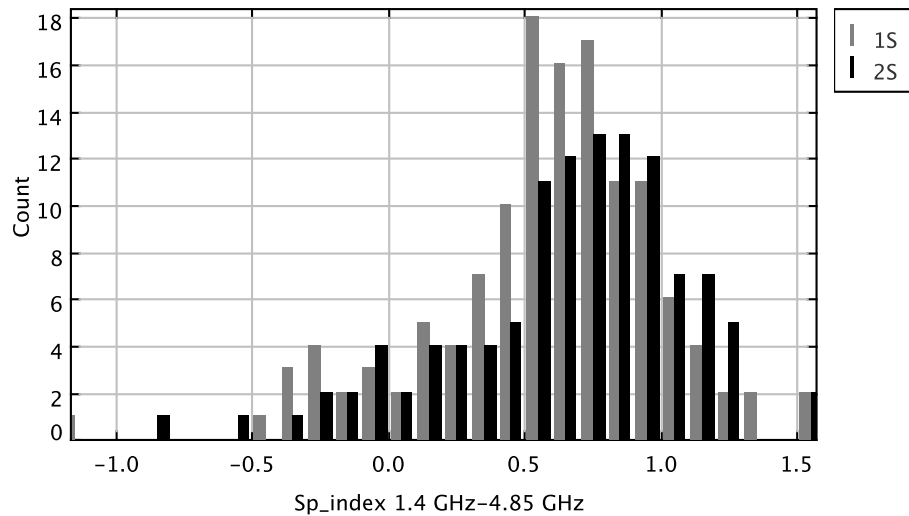


Рис. 12: Распределение спектрального индекса $\alpha_{1.4GHz-4.85GHz}$ для выборок 1S (серый цвет) и 2S (черный цвет).

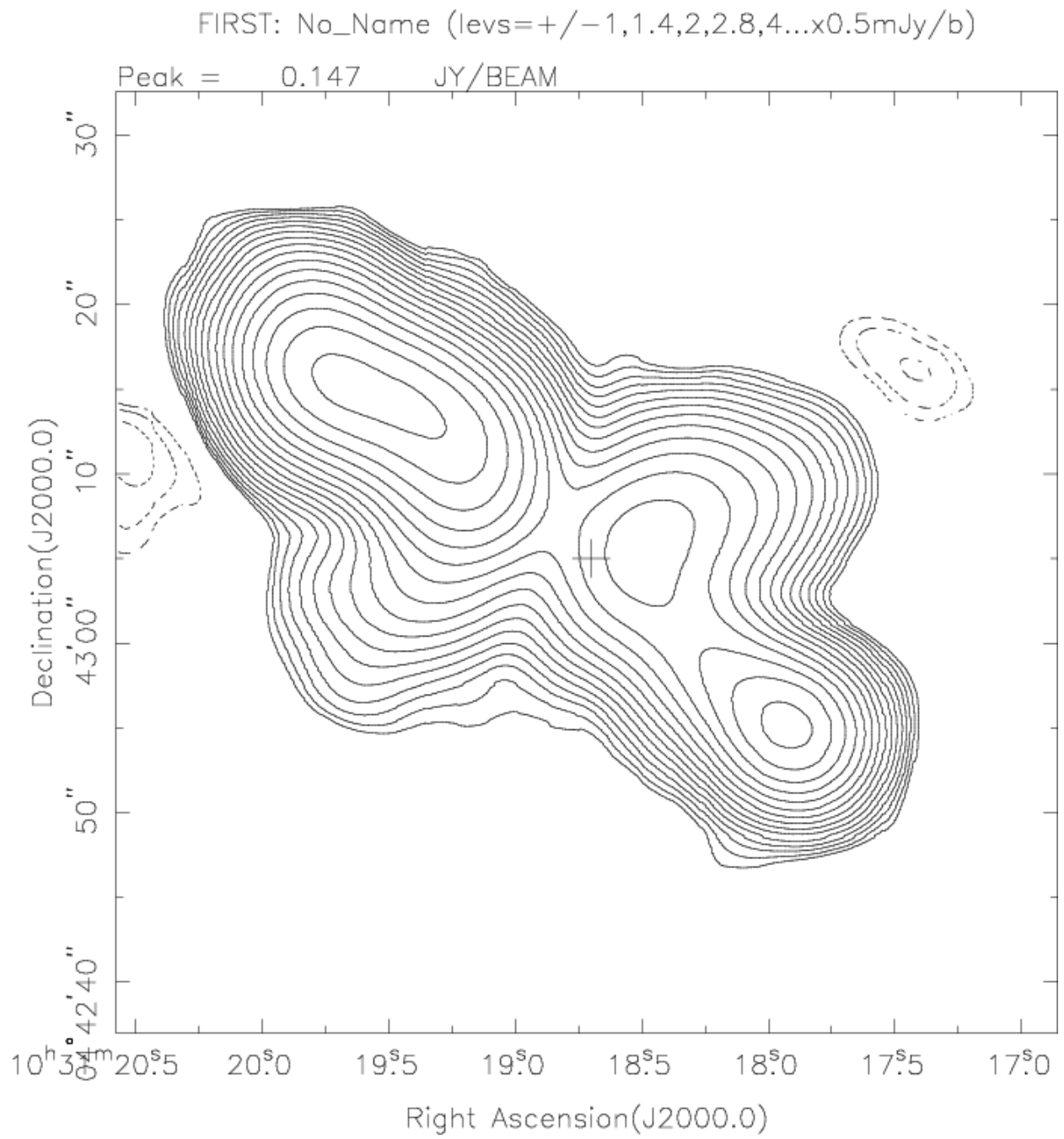


Рис. 13: RC J1031+0443. Пример радиисточника с “X-shaped” морфологией.

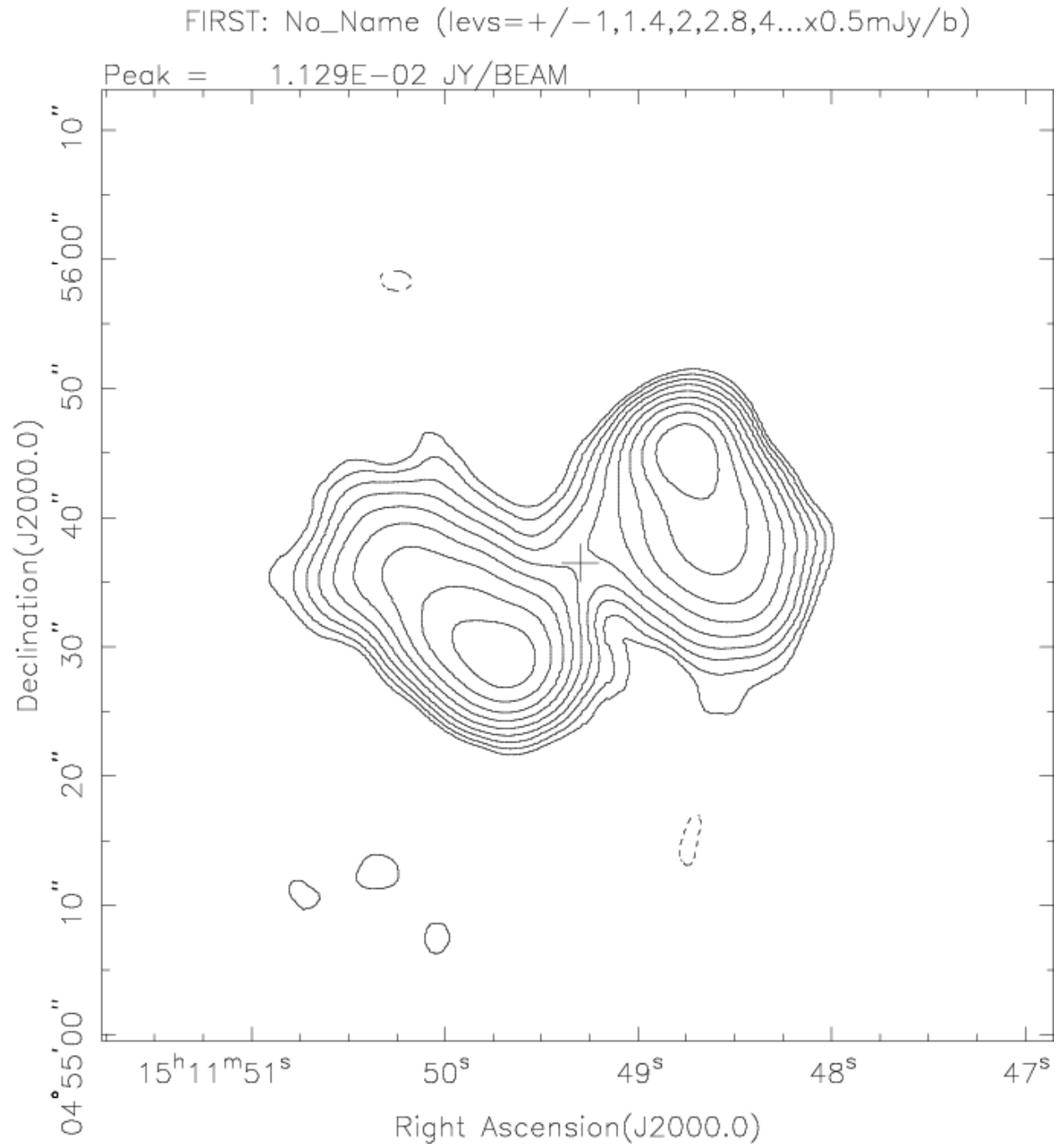


Рис. 14: RC J1511+045. Пример радиоисточника с “X-shaped” морфологией.

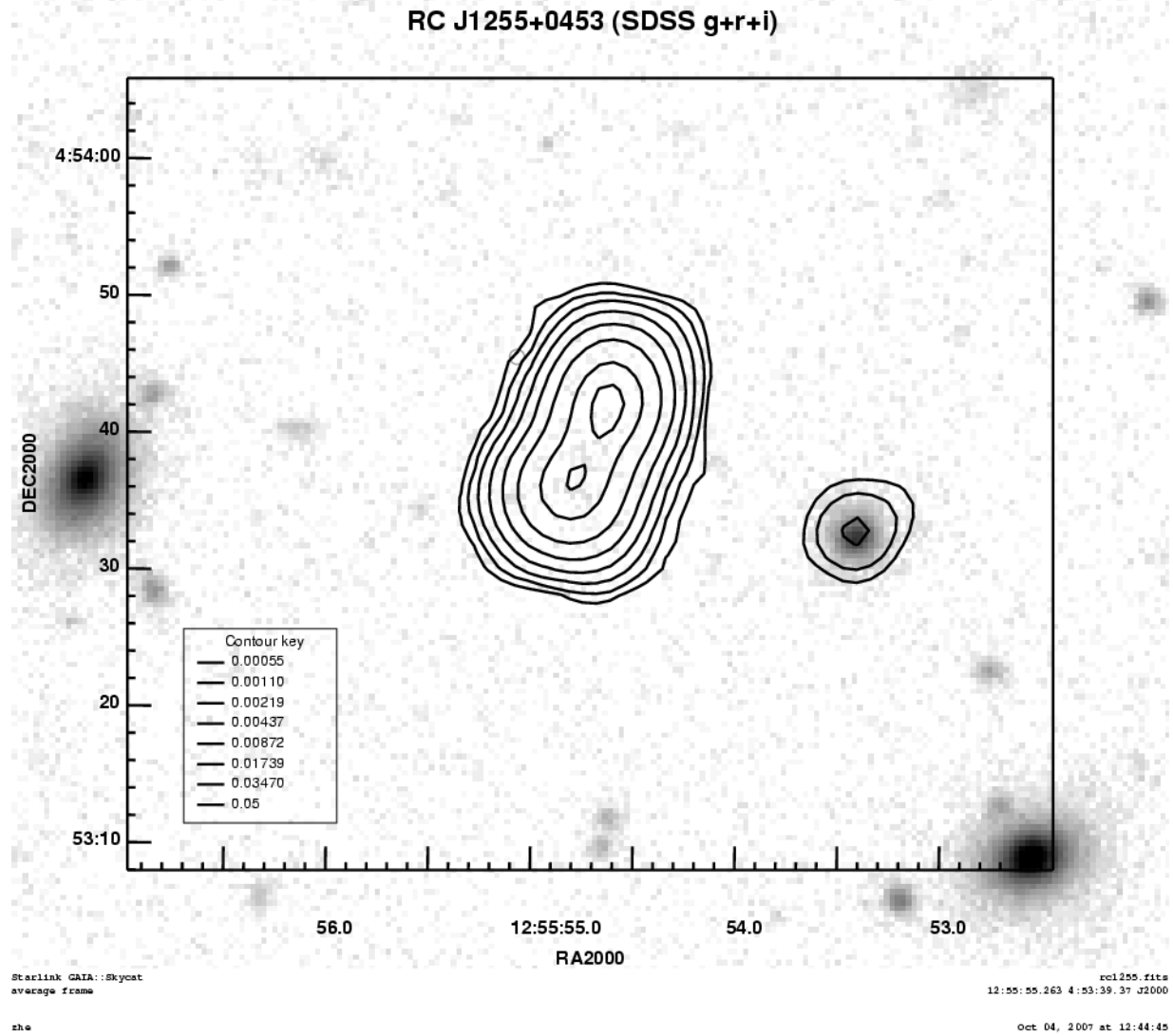


Рис. 15: RC J1255+045. Группа из двух радиисточников.

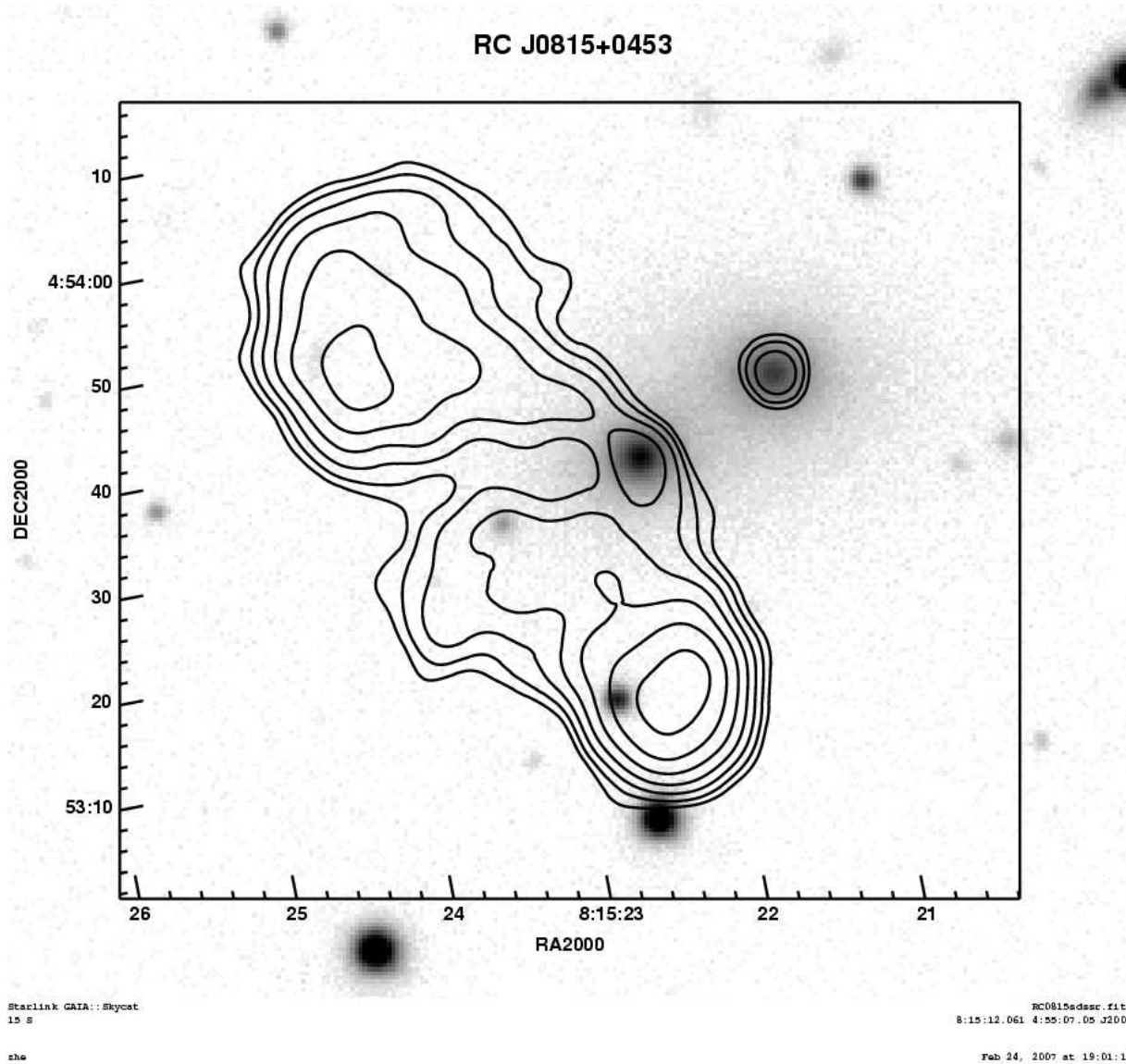


Рис. 16: RC J0815+0453. Два соседних радиоисточника, отождествляющихся с эллиптическими галактиками. Составное изображение радио-оптика: контурами нарисовано изображение из обзора FIRST на области из обзора SDSS (г фильтр).