

УДК 52-77(083.8)

ГЛУБОКИЕ ОБЗОРЫ ПОЛОСЫ НЕБА НА РАТАН-600 НА СКЛОНЕНИИ ИСТОЧНИКА SS433 НА ВОЛНЕ 7.6 СМ В ПЕРИОД 1980–1999 гг. ОБРАБОТКА ДАННЫХ И КАТАЛОГ РАДИОИСТОЧНИКОВ В ДИАПАЗОНЕ $7^h \leq \text{R.A.} < 17^h$

© 2010 Н.С. Соболева¹, Е. К. Майорова²,
О. П. Желенкова², А. В. Темирова¹, Н. Н. Бурсов²

¹Санкт-Петербургский филиал САО РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 16 апреля 2009 г.; принята в печать 15 июня 2009 г.

В работе двумя независимыми методами осуществляется обработка данных обзоров, проводившихся на РАТАН-600 на волне 7.6 см в 1988–1999 г. на склонении источника SS433. Кроме того, переобработаны данные обзора “Холод” (1980–1981 гг.). В результате получен RCR-каталог (RATAN COLD REFINED), в котором представлены прямые восхождения и плотности потоков объектов, отождествленных с объектами NVSS-каталога, в диапазоне прямых восхождений $7^h \leq \text{R.A.} < 17^h$. Построены спектры источников и определены их спектральные индексы на частотах 3.94 и 0.5 ГГц. Для построения спектров привлекались все известные каталоги, доступные с помощью ресурсов CATS, Vizier и NED, а также оценки плотностей потоков, полученные по картам VLSS и GB6-обзоров. Из 550 объектов RCR-каталога для 245 имеются данные о плотностях потоков только на двух частотах: 3.94 ГГц (RCR) и 1.4 ГГц (NVSS). В основном это источники с плотностями потоков меньше 30 мЯн. Около 65% из них имеют плоский или инверсионный спектр ($\alpha > -0.5$). Проводится анализ надежности полученных результатов по всему списку объектов. Построены гистограммы распределения спектральных индексов и плотностей потоков источников. Основной вывод работы состоит в том, что объектов, не попавших в дециметровые каталоги в этом интервале прямых восхождений на уровне 10–15 мЯн, не обнаружено.

Ключевые слова: *радиоисточники*

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1991 году в *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* был опубликован каталог радиоисточников (RC-каталог) на волне 7.6 см в интервале прямых восхождений $4^h \leq \text{R.A.} < 22^h$ и на волне 31 см в интервале $4^h \leq \text{R.A.} < 13^h$ на склонении $\text{Dec}_{2000} = 5^\circ \pm 20'$ [1]. Этот каталог был получен по результатам наблюдений, проводившихся в 1980–1981 гг. на РАТАН-600 в меридиане и азимуте 30° [2–4]. Координатная привязка осуществлялась по наиболее точному в то время каталогу UTRAO (365 МГц)¹.

После появления NVSS и FIRST-каталогов (1.4 ГГц, VLA) [5, 6] было проведено сравнение

RC-объектов с объектами этих каталогов, которое показало, что около 20–25% RC-объектов не отождествляются с NVSS-объектами [7].

С целью уточнения RC-каталога, в частности, уточнения плотностей потоков и координат входящих в него источников, с 1987 по 1999 гг. было проведено несколько дополнительных циклов наблюдений в меридиане на Северном секторе РАТАН-600. Они проводились, как и ранее, на склонении источника SS433. Вследствие прецессии склонение менялось от цикла к циклу. Однако эти изменения оказались слишком малы, чтобы с достаточной точностью определить склонения объектов RCR-каталога. Результаты обработки этих наблюдений в диапазоне прямых восхождений $2^h \leq \text{R.A.} < 7^h$ и $17^h \leq \text{R.A.} < 22^h$ опубликованы в работе [8].

В настоящей работе приводятся результаты обработки наблюдений 1987–1999 гг. в полосе прямых восхождений $7^h \leq \text{R.A.} < 17^h$ на волне 7.6 см.

¹Интересующая нас полоса неба из этого каталога была любезно предоставлена проф. Дж. Н. Дугласом до опубликования каталога.

Кроме того, в работу вошли результаты повторной обработки записей, полученных в эксперименте “Холод” в 1980 г.

Привязка по прямому восхождению осуществлялась по объектам NVSS-каталога. Значения склонений были взяты из NVSS-каталога.

Наблюдаемая область почти вся исследовалась на VLA с разрешением $5.4''$ (каталог FIRST, $8^h 11^m \leq R.A. < 16^h 26^m$), что позволяло уточнять структуру радиоисточников.

Мы приводим список объектов (RCR-каталог), выделенных в указанной выше полосе прямых восхождений и отождествленных с объектами NVSS-каталога [5]. Отдельно мы остановимся на надежности отождествления наших объектов с объектами этого каталога и обсудим статистические выводы по переобработанному RC-каталогу. Особое внимание будет уделено объектам с пекулярными спектрами, а также объектам, для которых плотности потоков известны только на двух частотах: 1.4 ГГц (NVSS) и 3.94 ГГц (RCR).

2. РЕДУКЦИЯ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Форма диаграммы направленности (ДН) РАТАН-600 существенно отличается от ДН параболоида [9–13]. Чем дальше по склонению горизонтальное сечение диаграммы направленности от центрального сечения, тем оно шире. Поэтому при обработке данных наблюдений были использованы два различных метода, которые в первую очередь отличались проведением фона на усредненных сканах.

В первом методе фон проводился с “окном сглаживания” 80 сек, во втором методе — 20 сек. При выборе “окна сглаживания” использовались зависимости $HPBW(\Delta Dec)$, полученные расчетным путем и проверенные экспериментально [13, 14] ($HPBW$ — полуширина ДН в горизонтальном сечении, ΔDec — расстояние по склонению от горизонтального центрального сечения).

Можно утверждать, что проведение фона с “окном” 80 сек должно отфильтровывать на записях радиоисточники, проходящие через ДН на расстояниях, превышающих $Dec_0 \pm 50'$ по склонению, с “окном” 20 сек — на расстояниях, превышающих $Dec_0 \pm 12'$, где Dec_0 — склонение центрального сечения цикла наблюдения.

В действительности, при проведении фона с “окном” 20 сек на расстояниях $\Delta Dec > \pm 8'$ имеет место не полное удаление источника, а только занижение его антенной температуры. В полосе $\Delta Dec \leq \pm 8'$ занижений антенных температур источников не происходит.

При проведении фона с “окном” 80 сек может сказываться влияние атмосферы, при проведении

фона с “окном” 20 сек влияние атмосферы минимально, так как происходит фильтрация низкочастотного шума, в том числе и атмосферных флуктуаций.

Таким образом, эти два метода приводят к различным систематическим ошибкам при определении плотностей потоков радиоисточников. Если в первом методе за счет влияния атмосферы мы можем завязать величину плотностей потоков, то во втором есть тенденция к занижению плотностей потоков удаленных объектов.

После проведения фона источники на усредненных сканах выделялись с помощью гаусс-анализа. Привязки по времени осуществлялись по сильным источникам с использованием данных NVSS-каталога. Для каждого выделенного источника определялись R.A., антенная температура (T_a) и полуширина гауссианы ($HPBW_i$). В первом методе перед вписыванием гауссианы дополнительно проводилась “нулевая” линия в пределах данного объекта.

2.1. Первый метод

Поскольку одномерные усредненные сканы представляют собой суперпозицию источников, прошедших через различные горизонтальные сечения диаграммы направленности, для более уверенного их разделения и отождествления проводилось моделирование обзора с помощью NVSS-изображений [5, 15] аналогично тому, как это было сделано в работе [16] для RZF-обзора [17].

Нормированные модельные сканы использовались для сопоставления с реальными записями на волне 7.6 см после проведения фона с 80-секундным окном. На Рис. 1 приведены примеры нормированных модельных и реальных усредненных сканов. Нормировка сканов на Рис. 1(а) проводилась к уровню сигнала от источника 082056+045417, на Рис. 1(б) — к уровню сигнала от источника 114520+045526. Ось ординат — относительные единицы, ось абсцисс — прямое восхождение. Наиболее эффективны модельные сканы оказались в сложных случаях, когда происходит наложение двух или более источников.

При обработке данных каждого цикла наблюдений использовалась информация о величине ΔDec NVSS-источников, попадающих в полосу $Dec_0 \pm 1^\circ$, и зависимости $HPBW(\Delta Dec)$. Кроме того, были рассчитаны диаграммный коэффициент $k_{DN}(\Delta Dec)$ и произведение $F_{1.4} \times k_{DN}(\Delta Dec)$, где $F_{1.4}$ — плотность потока источника на частоте 1.4 ГГц. $HPBW(\Delta Dec)$ и $k_{DN}(\Delta Dec)$ рассчитывались по алгоритмам, представленным в работе [12]. Диаграммный коэффициент показывает насколько ослабляется отклик от источника при

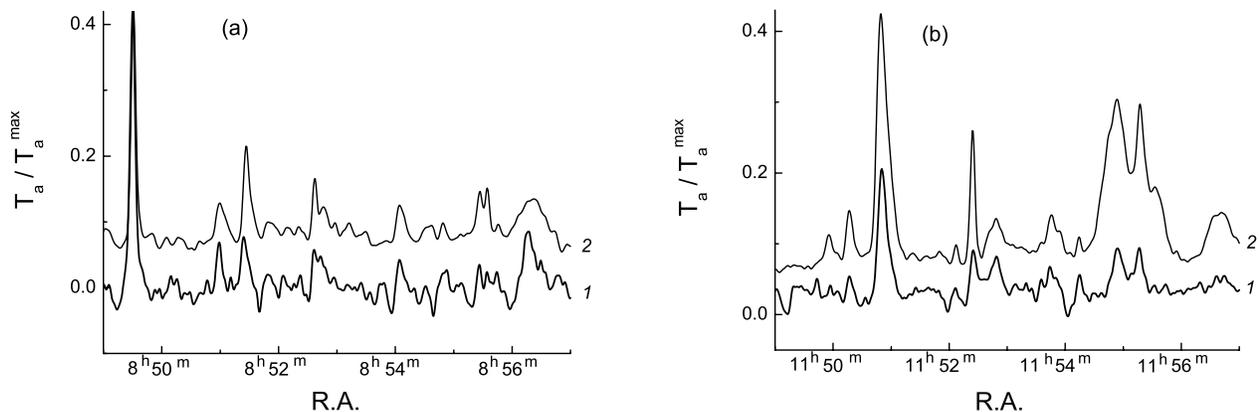


Рис. 1. Нормированные реальные усредненные записи RCR-обзора на волне 7.6 см (кривые 1) и нормированные модельные сканы тех же участков неба, полученные с помощью NVSS-изображений (кривые 2). Нормировка сканов на рисунке (а) проводилась к уровню сигнала от источника 082056+045417, на (б) — к уровню сигнала от источника 114520+045526. Ось ординат — относительные единицы, ось абсцисс — прямое восхождение.

удалении его от центрального сечения сета обзора (или центрального сечения ДН). Этот коэффициент используется при определении плотностей потоков источников. Произведение $F_{1.4} \times k_{DN}(\Delta Dec)$ дает информацию о вероятности появления источника на реальном скане. Значение этого произведения помогает также при выделении и отождествлении источников, имеющих близкое прямое восхождение.

Из списка источников NVSS-каталога, попадающих в полосу $Dec_0 \pm 1^\circ$, для дальнейшего рассмотрения были отобраны источники, для которых выполнялось условие $F_{1.4} \times k_{DN}(\Delta Dec) > 3$. Как показали дальнейшие исследования, источников, для которых $F_{1.4} \times k_{DN}(\Delta Dec) < 3$, на записях выделено не было.

Сравнение полученных из гаусс-анализа $HPBW$ с расчетными позволяло осуществлять контроль за надежностью выделения источников, а в ряде случаев помогало понять, тот ли источник мы выделили на записи.

Таким образом, в первом методе обработки в качестве контроля использовалось выполнение трех критериев при выделении источников: близость R.A. источника на записи с R.A. источника по NVSS-каталогу, близкая к расчетной полуширина гауссианы и достаточно большая величина произведения $F_{1.4} \times k_{DN}(\Delta Dec)$. Поскольку чувствительность менялась от цикла к циклу, минимальная (пороговая) величина произведения также менялась.

Плотности потоков источников в первом методе F_1 рассчитывались по формуле:

$$F_1 = A \times T_a / k_{DN},$$

$A = 2k/S_{eff}$, где k — постоянная Больцмана, S_{eff} — эффективная площадь радиотелескопа.

Коэффициент A находился для каждого цикла наблюдений с помощью методики, описанной в работе [14]. Для этого выбирались достаточно сильные источники с крутыми спектрами и известными спектральными индексами, вычислялись их плотности потоков на волне 7.6 см, а из реальных сканов находились антенные температуры этих источников в каждом цикле наблюдений. Далее строились зависимости $F/T_a(\Delta Dec)$, в которые методом наименьших квадратов вписывались аппроксимирующие кривые. Величина коэффициента A есть значение аппроксимирующей кривой в точке $\Delta Dec = 0$ в данном цикле наблюдений.

Диаграммный коэффициент k_{DN} рассчитывался в соответствии с ΔDec источника. При расчете учитывался вынос первичного рупора вдоль фокальной линии вторичного зеркала в данном цикле наблюдений. Полученные плотности потоков усреднялись по всем циклам наблюдений. Величины F_1 и R.A.₁ с погрешностями приведены в Табл.

Нужно отметить, что часть источников можно было выделить только в одном из циклов, в частности, в цикле 1980 г. как наиболее чувствительном. В некоторых случаях источники выделялись только на записях 1994 г., когда антенна устанавливалась на $4'$ выше ($H = 51^\circ 22'$) или ниже ($H = 51^\circ 09'$) склонения источника SS433. Ошибка определения плотностей потоков источников, выделенных только в одном из циклов, составляет $(20 \pm 5)\%$.

Средние по всем наблюдениям за год значения среднеквадратичной ошибки шумов на записях $\overline{3\sigma}$ в мК составили: 2.2 ± 0.5 мК для сета 1980 г., 3.4 ± 0.4 мК — 1988 г., 4.9 ± 1.7 мК — 1993 г.,

3.2 ± 0.4 мК — 1994 г., 4.5 ± 1.7 мК — 1994 г. ($H = 51^\circ 09'$), 3.7 ± 0.7 мК — 1994 г. ($H = 51^\circ 22'$).

На Рис. 2 приводятся изменения среднеквадратичной ошибки шумов (3σ) на усредненных сканах в разные часы наблюдений для сетов разных лет в мЯн. 94m и 94p соответствуют записям, полученным в 1994 г. при установке антенны, соответственно, на $4'$ ниже и $4'$ выше склонения источника SS433.

Средние по всем наблюдениям за год величины $\overline{3\sigma}$ в мЯн составили: 8.0 ± 0.5 мЯн для сета 1980 г., 10.6 ± 1.3 мЯн — 1988 г., 10.4 ± 3.7 мЯн — 1993 г., 9.6 ± 1.2 мЯн — 1994 г., 13.5 ± 5.5 мЯн — 1994 г. ($H = 51^\circ 09'$), 11.1 ± 2.0 мЯн — 1994 г. ($H = 51^\circ 22'$). Среднеквадратичные ошибки получены по сканам, на которых был вычтен 80-секундный фон.

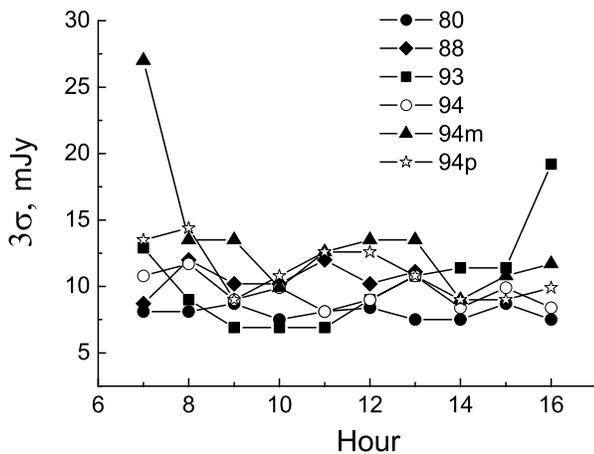


Рис. 2. Среднеквадратичная ошибка шумов (3σ) на усредненных сканах в зависимости от часа наблюдений, полученная по сетам разных лет. 94m и 94p соответствуют сканам, полученным в 1994 г. при установке антенны на $4'$ ниже и $4'$ выше склонения источника SS433. Использованы сканы с вычтенным 80-секундным фоном.

2.2. Второй метод

После проведения фона вторым способом методом гаусс-анализа определялось положение радиоисточников на скане (R.A.), их антенная температура и полуширина. Используя значение антенной температуры, вычислялась плотность потока радиоисточника F_2 по формуле:

$$F_2 = k_{eff} \times k_i \times T_a / k_{DN},$$

где k_{eff} — коэффициент, учитывающий эффективную площадь антенны, k_i — корректирующий коэффициент, учитывающий различие калибровок

и небольшое различие эффективной площади антенны в разных циклах наблюдений. Величина k_i определялась по источникам с хорошо известным спектром, попадающим в полосу обзора. В зависимости от года наблюдений k_i было в диапазоне 1.1–1.5. Значение k_{eff} равнялось 3.5. Диаграммный коэффициент рассчитывался для каждого радиоисточника с учетом поперечного выноса первичного облучателя вдоль фокальной линии вторичного зеркала и расстояния радиообъекта по вертикали до центрального сечения диаграммы направленности по алгоритмам, представленным в работе [12].

Критерием достоверности считалось наличие объекта на сканах в более, чем двух циклах наблюдений. Перед выделением объектов сканы были сглажены расчетной диаграммой направленности в ее центральном сечении. Подробно методика обработки описана в работе [18].

После определения плотностей потоков и прямых восхождений объектов в каждом цикле наблюдений вычислялась средняя по всем циклам величина плотности потока F_2 и $R.A._2$ с соответствующими погрешностями (см. Табл.).

Среднеквадратичная ошибка шумов на записях в этом методе обработки данных оказывается несколько ниже, чем в первом методе, во-первых, из-за сглаживания записей диаграммой направленности, во-вторых, из-за “подрезания” шумов после вычитания 20-секундного фона.

3. КАТАЛОГ РАДИОИСТОЧНИКОВ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 7.6 СМ

Результаты определения плотностей потоков и прямых восхождений источников на волне 7.6 см приведены в каталоге, пример из которого приведен в Таблице.

В столбце 1 приводятся координаты источников по NVSS-каталогу на эпоху 2000.0; в столбцах 2 и 3 — разности прямых восхождений объектов между координатами NVSS-каталога и полученными нами погрешностями ΔRA_1 (первый метод, Майоровой), ΔRA_2 (второй метод, Соболевой–Темировой); в столбцах 4 и 5 — плотности потоков с погрешностями: F_1 — плотности потоков, полученные Е. К. Майоровой первым методом, F_2 — плотности потоков, полученные Н. С. Соболевой и А. В. Темировой вторым методом. В столбцах 6 и 7 приведены величины спектральных индексов $\alpha_{3.94}$ и $\alpha_{0.5}$ ($F_\nu \sim \nu^\alpha$) объектов, определенные на двух частотах 3.94 ГГц и 0.5 ГГц (частота 0.5 ГГц была выбрана по аналогии с [19]). В столбцах 8–10 — примечания.

Полученные двумя способами плотности потоков источников использовались при построении

спектров. Для этой цели были также привлечены все известные каталоги, доступные с помощью ресурсов CATS [20, 21], Vizier [22] и NED [23], с которыми пересекается полоса нашего обзора.

Спектры аппроксимировались кривыми, по которым определялись спектральные индексы объектов на частотах 3.94 ГГц ($\alpha_{3.94}$) и 0.5 ГГц ($\alpha_{0.5}$).

Таблица. Пример RCR-каталога на длине волны 7.6 см в интервале прямых восхождений $7^h \leq \text{R.A.} < 17^h$ (1980–1999 гг.)

R.A. ₂₀₀₀ Dec ₂₀₀₀ NVSS	$\Delta\text{RA}_1 \pm \sigma$ s.ss s.ss	$\Delta\text{RA}_2 \pm \sigma$ s.ss s.ss	$F_1 \pm \sigma$ mJy	$F_2 \pm \sigma$ mJy	$\alpha_{3.94}$	$\alpha_{0.5}$	pr1	pr2	pr3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
070209.13+044011.3	1.03 ± 0.51	-1.97 ± 0.84	247 ± 25	174 ± 10	-0.98	-0.72			
070210.69+044837.1	2.59 ± 0.50		19.4 ± 1.4		-0.68			#	
070309.94+045510.7	1.00 ± 0.42	0.70 ± 0.88	13.1 ± 3.0	14.2 ± 2.0	-0.61			*	#
070424.60+050418.7	-0.31 ± 0.36	0.66 ± 0.27	26.6 ± 4.0	19.3 ± 3.3	-0.30			*	
070451.88+050358.9	0.00 ± 0.73	0.06 ± 0.94	18.4 ± 3.5	24.3 ± 2.4	0.01		d G	*	#
070612.43+045546.8	0.33 ± 0.54	0.14 ± 0.41	8.2 ± 1.2	9.3 ± 2.1	-0.34			*	#
070745.79+045525.9							b	*	#
070747.30+045414.0	0.92 ± 0.43	0.51 ± 0.10	21.7 ± 2.1	22.9 ± 2.7	-0.19		b G		#
071130.04+045140.0	0.04 ± 0.30	0.42 ± 0.32	33.4 ± 3.0	39.0 ± 3.9	-0.79		b G		#
071130.37+050037.0	0.37 ± 0.30	0.75 ± 0.32					b		#
071141.16+045416.2	-0.29 ± 0.27	0.08 ± 0.80	8.3 ± 1.4	10.0 ± 1.0	-0.20			*	#
071350.65+050210.2	0.53 ± 0.25	0.01 ± 0.13	29.8 ± 4.8	23.2 ± 4.2	-0.69	-0.69	V		
071414.01+045526.9	0.54 ± 0.10		11.0 ± 6.0		-0.57		G	*	#
071616.25+050016.3	-0.65 ± 0.51	2.19 ± 0.75	10.0 ± 1.5	9.7 ± 1.8	-0.19		G		#
071833.98+045632.9	-0.06 ± 0.48	0.13 ± 0.35	35.7 ± 5.0	20.5 ± 4.5	-0.75	-0.75	b		
071834.62+045248.0	0.58 ± 0.50	0.77 ± 0.35					b G		
071900.99+044705.2	-0.06 ± 1.40	1.56 ± 0.71	51.4 ± 6.7	38.4 ± 5.3	-1.06	-1.06			
071910.80+045746.6	0.67 ± 0.32	1.17 ± 0.45	9.5 ± 1.5	14.6 ± 4.2	-0.52			*	#
072043.38+045026.1	2.06 ± 1.30	0.26 ± 0.63	28.2 ± 4.2	21.3 ± 4.7	-0.27		G		#
072219.15+045455.4	-0.11 ± 0.31	-0.16 ± 0.18	23.9 ± 2.2	22.2 ± 2.1	-0.29		G		#
072318.92+045535.0	-0.13 ± 0.37	-0.03 ± 0.59	11.8 ± 1.3	16.3 ± 1.0	-0.91	-0.91	G, V	*	#
072415.87+044525.1	1.20 ± 0.83	2.02 ± 0.61	78.6 ± 2.8	60.5 ± 3.1	-0.71	-0.87			
072500.61+045008.9	-0.16 ± 0.25	0.34 ± 0.78	20.7 ± 3.0	16.0 ± 1.3	-0.37			*	#

При построении спектров в дополнение к имеющимся данным известных каталогов были привлечены оценочные значения плотностей потоков, полученные О. П. Желенковой по картам обзоров VLSS (74 МГц) [24] и GB6 (4850 МГц) [25]. Такие оценки были сделаны для объектов нашего списка, которые не вошли в VLSS и GB6-каталоги, так как

их плотности потоков лежали ниже уровня 5σ (σ — среднеквадратичная ошибка уровня шума данной карты). Были выделены объекты с плотностями потоков $3\sigma \leq F < 5\sigma$. В столбце 8 Таблицы такие источники помечены буквами V и G.

Кроме того, здесь же отмечены источники, имеющие особенности спектра (hill (бу-

гор), GPS (Gigahertz Peak Spectrum), HFP (High Frequency Spectrum), var (переменный)), двойные источники (d) и источники, которые не разделяются на записях (b) — бленды. Значок ** указывает на большой разброс спектральных данных источника; hill, HFP и GPS обозначены объекты, имеющие максимум в спектре, в частности, “hill” обозначает источник, в спектре которого имеется небольшой максимум на частоте близкой к 3.94 ГГц. В столбце 9 значком * помечены объекты, чьи антенные температуры на записях лежат в диапазоне $3\sigma \leq T_a < 5\sigma$. Антенные температуры остальных источников превышают 5σ .

В столбце 10 значком # помечены объекты, у которых данные о плотностях потоков имеются только в двух каталогах — NVSS и RCR (RC). Часть из них имеют оценки плотностей потоков из карт VLSS и GB6.

Оценки плотностей потоков на частоте 4850 МГц, полученные по картам GB6, позволили подтвердить надежность выделения на наших сканах слабых объектов. Оценки на частоте 74 МГц (VLSS-карты) в ряде случаев подтвердили прямолинейность спектров радиоисточников. Однако, для источников, у которых нет данных о плотностях потоков на частотах ниже 1.4 ГГц, эти оценки не использовались для определения спектрального индекса на частоте 500 МГц. Поэтому даже в случае прямолинейного спектра индекс $\alpha_{0.5}$ в Табл. не приводится.

Всего в полосе прямых восхождений $7^h \leq R.A. < 17^h$ было выделено 550 объектов, из них 18 бленд и 15 двойных источников. Все они отождествлены с объектами NVSS-каталога. Число источников, у которых плотности потоков определены только на двух частотах (3.94 ГГц — РАТАН-600 и 1.4 ГГц — VLA), составило 245. Часть из них подтверждено оценками плотностей потока на частоте 4.85 ГГц, полученными по GB6-картам или данными, полученными на РАТАН-600 на частотах 7.7 и 11.111 ГГц в тех же циклах наблюдений.

В каталоге не представлена область $16^h 50^m 55^s < R.A. < 16^h 51^m 30^s$, так как источники, попадающие в эту область, блендируются яркой протяженной радиогалактикой Геркулес А. Кроме того, в RCR отсутствуют области порядка минуты в начале каждого часа, когда осуществлялась калибровка радиометра.

4. НАДЕЖНОСТЬ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ RCR-ОБЪЕКТОВ

Для оценки надежности отождествления RCR-объектов с объектами NVSS-каталога использовались данные по всему списку источников в полосе прямых восхождений $7^h \leq R.A. < 17^h$.

Были посчитаны разности прямых восхождений источников между NVSS- и RCR-каталогами ΔRA_1 , ΔRA_2 и построены гистограммы их распределения для первого и второго методов обработки, а также для их усредненных величин ΔRA_{mean} . Они показаны на Рис. 3.

На Рис. 3(a) приведена гистограмма распределения разности $\Delta RA_1 = R.A._{NVSS} - R.A._1$; на Рис. 3(b) — $\Delta RA_2 = R.A._{NVSS} - R.A._2$; на Рис. 3(c) — $\Delta RA_{mean} = R.A._{NVSS} - R.A._{mean}$, где $R.A._{mean} = (R.A._1 + R.A._2)/2$.

Кроме того, были оценены средние по всей выборке источников значения $\overline{\Delta RA}$, полученные обоими способами и при их усреднении. Средние по всей выборке источников значения $\overline{\Delta RA}$ составили: $\overline{\Delta RA}_1 = (0.63 \pm 1.11)$ сек, $\overline{\Delta RA}_2 = (0.29 \pm 1.08)$ сек, $\overline{\Delta RA}_{mean} = (0.52 \pm 1.05)$ сек.

Для источников с хорошо изученными спектрами, с известными плотностями потока на нескольких частотах, мы определили ожидаемые значения плотностей потоков F_{sp} на частоте 3.94 ГГц и вычислили отношения F_{sp}/F_1 , F_{sp}/F_2 и F_{sp}/F_{mean} , где F_1 , F_2 и F_{mean} — плотности потоков источников RCR-каталога, полученные первым, вторым способами, и их средние значения. Соответствующие распределения показаны на Рис. 4: (a) приведена гистограмма, показывающая распределение отношения F_{sp}/F_1 , на (b) — отношения F_{sp}/F_2 и на (c) — отношения F_{sp}/F_{mean} , где $F_{mean} = (F_1 + F_2)/2$.

Медианные значения гистограмм на Рис. 4 равны: 0.99 — (a), 1.03 — (b), 0.99 — (c). Средние по всей выборке источников отношения $\overline{F_{sp}/F}$ составили: 0.98 ± 0.01 , 1.09 ± 0.03 и 1.00 ± 0.01 , соответственно, для плотностей потоков, полученных первым и вторым способами, и их усредненных величин.

Отсюда следует, что наилучшее согласие плотностей потоков RCR-каталога на волне 7.6 см с ожидаемыми значениями плотностей потоков, полученными по спектральным данным хорошо изученных радиоисточников, дает полусумма плотностей потоков, полученных двумя независимыми методами. Плотности потоков, полученные первым способом в среднем оказались несколько завышенными, полученные вторым способом — заниженными. Напомним, что в первом случае фон проводился с “окном сглаживания” 80 сек, во втором — с “окном сглаживания” 20 сек.

Таким образом, применение двух разных независимых способов для выделения источников и определения их характеристик оказалось целесообразным и оправданным.

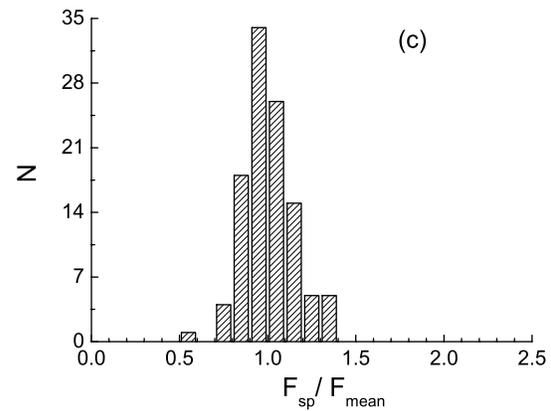
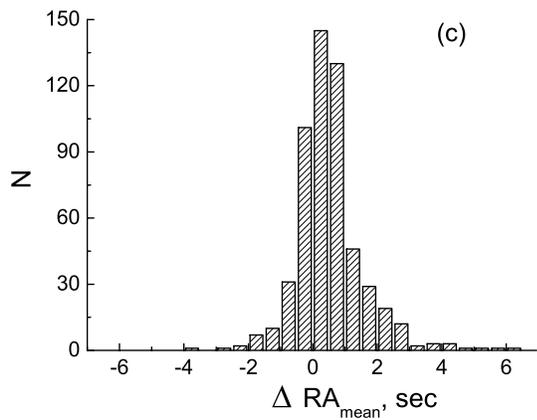
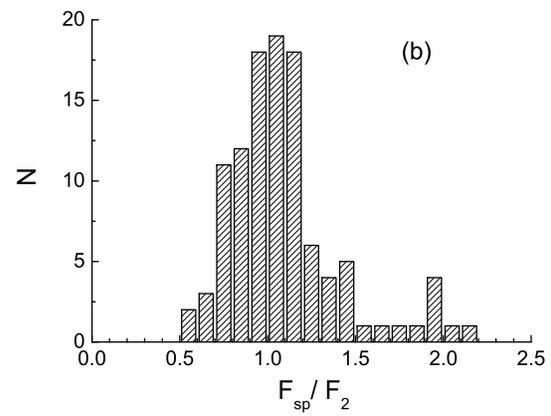
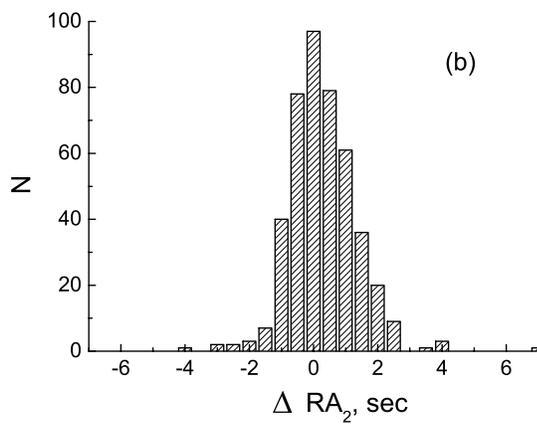
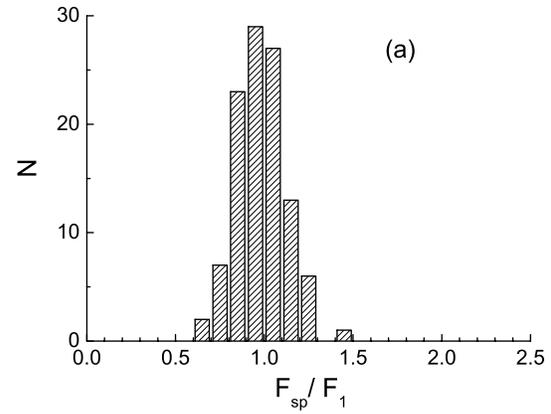
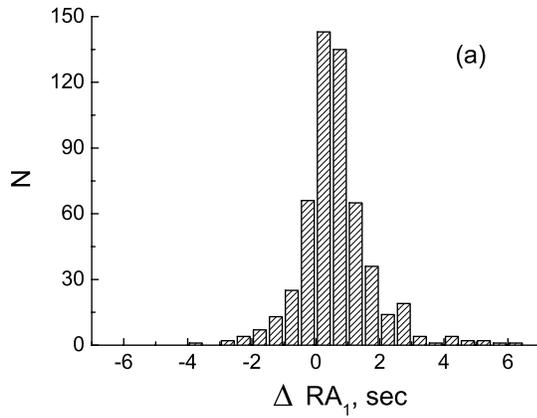


Рис. 3. Гистограммы распределения разности прямых восхождений источников RCR и NVSS-каталогов: (a) $\Delta RA = R.A._{NVSS} - R.A._1$; (b) $\Delta RA = R.A._{NVSS} - R.A._2$; (c) $\Delta RA = R.A._{NVSS} - R.A._{mean}$, где $R.A._{mean} = (R.A._1 + R.A._2)/2$.

Рис. 4. Гистограммы отношения ожидаемых на частоте 3.94 ГГц плотностей потоков F_{sp} , полученных по спектрам хорошо изученных источников, к плотностям потоков тех же источников, полученным в настоящей работе разными методами. (a) F_{sp}/F_1 , (b) F_{sp}/F_2 , (c) F_{sp}/F_{mean} , где $F_{mean} = (F_1 + F_2)/2$.

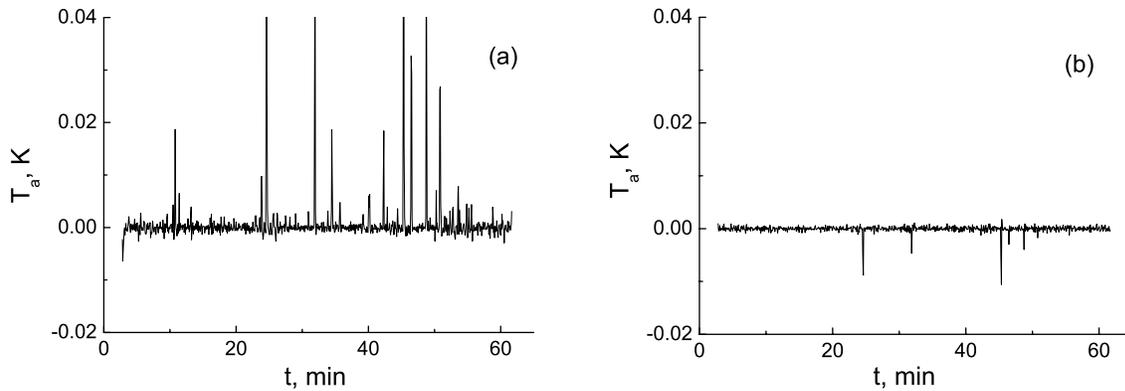


Рис. 5. Сумма (а) и разность (б) усредненных сканов, полученных по двум группам записей 11-го часа 1994 г.

Хорошим способом проверки надежности выделения источников на сканах является следующий метод. Все сканы данного часа делятся на две группы, равные по численности сканов. Затем сканы каждой группы усредняются. Усредненные сканы сравниваются на наличие того или другого источника на записи. Кроме того, находится разность этих усредненных сканов. Процедура вычитания сканов убирает с некоторой точностью все невидимые по причине ограниченной чувствительности слабые объекты (эффект насыщения), и на разностном скане мы видим лишь шумовую дорожку приемника и шумы атмосферы.

На Рис. 5 приведены: сумма (а) и разность (б) усредненных сканов, полученных по двум группам записей 11-го часа 1994 г. Небольшие (порядка 8%) «отрицательные источники» свидетельствуют о точности измерений плотностей потоков объектов. Этот способ применялся во втором методе обработки данных.

5. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИНДЕКСЫ РАДИОИСТОЧНИКОВ RCR-КАТАЛОГА

Здесь мы остановимся на анализе спектральных индексов радиоисточников на частоте 3.94 ГГц ($\alpha_{3.94}$). Для этого разделим все источники RCR-каталога на три группы.

Первая группа — это источники, для которых имеются данные о плотностях потоков из других каталогов.

Вторая группа — это яркие, известные по другим каталогам, объекты с хорошо изученными спектрами, для которых имеются данные о плотностях потоков на нескольких частотах. По этой группе источников проверялась надежность определения прямых восхождений и плотностей потоков объектов RCR-каталога (см. предыдущий параграф). Источники этой группы входят и в первую группу.

Третья группа — это источники, данные о которых имеются только в двух каталогах, NVSS и RCR, на частотах 1.4 ГГц и 3.94 ГГц. Для части из них были сделаны оценки плотностей потоков по картам обзоров GB6 (4.85 ГГц) и VLSS (74 МГц).

Остановимся сначала на второй группе источников с хорошо изученными спектрами. Посмотрим, как меняются их спектры при добавлении оценочных значений плотностей потоков, полученных по GB6 и VLSS-картам.

На Рис. 6(а) показана гистограмма распределения спектральных индексов этой группы на частоте 3.94 ГГц ($\alpha_{3.94}$), полученная при добавлении оценочных данных на частоте 4.85 ГГц (GB6-карты). Оказалось, что оценочные значения плотностей потоков достаточно хорошо согласуются с уже имеющимися данными, в том числе и с данными, полученными нами на частоте 3.94 ГГц. Спектральный индекс на этой частоте менялся при внесении оценочных данных из карт GB6 очень незначительно, в среднем на 0.05. То есть оценки плотностей потоков, полученных из карт GB6-обзора, могут быть использованы и при построении спектров источников, для которых имеются данные только на двух частотах (источников третьей группы). Они не должны сильно менять их спектральные индексы. В то же время оценочные значения на частоте 4.85 ГГц служат косвенной проверкой надежности наших данных на частоте 3.94 ГГц для этой группы источников.

На Рис. 6(б) представлена гистограмма распределения спектральных индексов источников второй группы с хорошо изученными спектрами после добавления в их спектры оценочных данных по VLSS-картам. В ряде случаев использование оценок плотностей потоков на частоте 74 МГц практически не меняло спектральный индекс на частоте 3.94 ГГц, но иногда приводило к незначительному

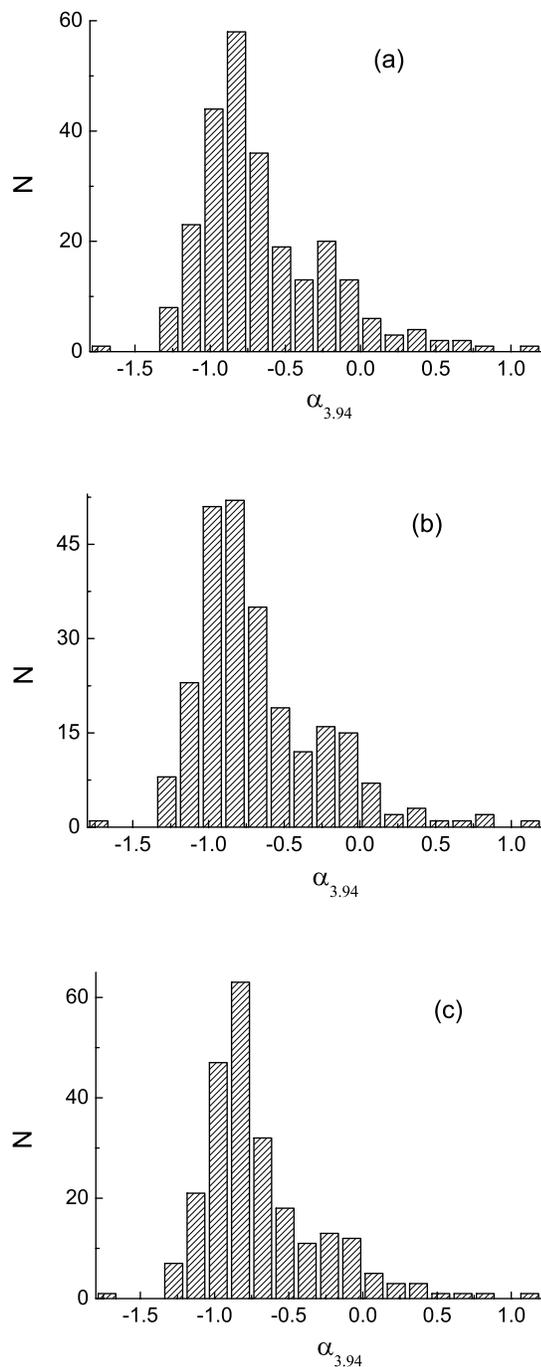


Рис. 6. Гистограммы распределения спектральных индексов на частоте 3.94 ГГц источников второй группы с хорошо изученными спектрами: (а) — с учетом оценок по картам обзора GB6, (б) — с учетом оценок по VLSS-картам, (с) — с учетом оценок по GB6-картам и выборочных оценок по VLSS-картам.

уплощению спектра. Однако в большинстве случаев учет оценочных значений делал спектр круче на частоте 3.94 ГГц и более плоским на низких частотах.

Эти изменения хорошо видны при сравнении Рис. 6(а) и 6(б): количество источников со спектральными индексами, равными -0.8 и -1.0 , на Рис. 6(б) увеличилось. Также увеличилось число источников со спектральным индексом $\alpha_{3.94} \sim -0.15$.

В дальнейшем при построении спектров мы весьма осторожно использовали оценки плотностей потоков, полученные по VLSS-картам. Эти данные прежде всего использовались там, где они не противоречили данным других каталогов. В случае, когда имели место расхождения между данными VLSS и данными TXS-каталога, предпочтение отдавалось последним или спектр аппроксимировался прямой линией.

На Рис. 6(с) представлено распределение спектральных индексов $\alpha_{3.94}$ для той же группы источников с учетом оценочных значений по GB6-картам и выборочных оценок по VLSS-картам; они приведены в Таблице.

На Рис. 7(а) приведена гистограмма распределения спектральных индексов $\alpha_{3.94}$ для всех источников RCR-каталога в исследованной полосе $7^h \leq \text{R.A.} < 17^h$. Гистограмма распределения спектральных индексов для объектов первой группы представлена на Рис. 7(б), а на Рис. 7(с) — для объектов третьей группы.

Кроме того, были построены гистограммы распределения спектральных индексов для объектов, чьи антенные температуры на усредненных сканах $T_a \geq 5\sigma$ (Рис. 8(а)) и для источников, чьи T_a удовлетворяют условию $3\sigma \leq T_a < 5\sigma$ (Рис. 8(б)). Последние помечены в Таблице звездочкой.

Из гистограмм на представленных рисунках следует, что большинство объектов RCR-каталога, у которых плотности потоков хорошо известны на многих частотах, имеют стандартные степенные спектры со спектральными индексами в диапазоне $-1.12 < \alpha_{3.94} < -0.5$.

В распределениях спектральных индексов на Рис. 7(а) отчетливо видны три, а на Рис. 6, Рис. 7(б) и 8(а) два максимума, что свидетельствует о наличии двух и более популяций радиоисточников среди объектов нашего списка. Максимумы на Рис. 7(а) соответствуют спектральным индексам $\alpha_{3.94max} = -0.8, -0.3$ и $+0.45$.

Менее уверенно второй максимум выделяется у объектов третьей группы, имеющих данные о плотностях потоков только на двух частотах. Основной максимум $\alpha_{3.94max} \sim -0.45$ и менее уверенный — $\alpha_{3.94max} \sim +0.50$.

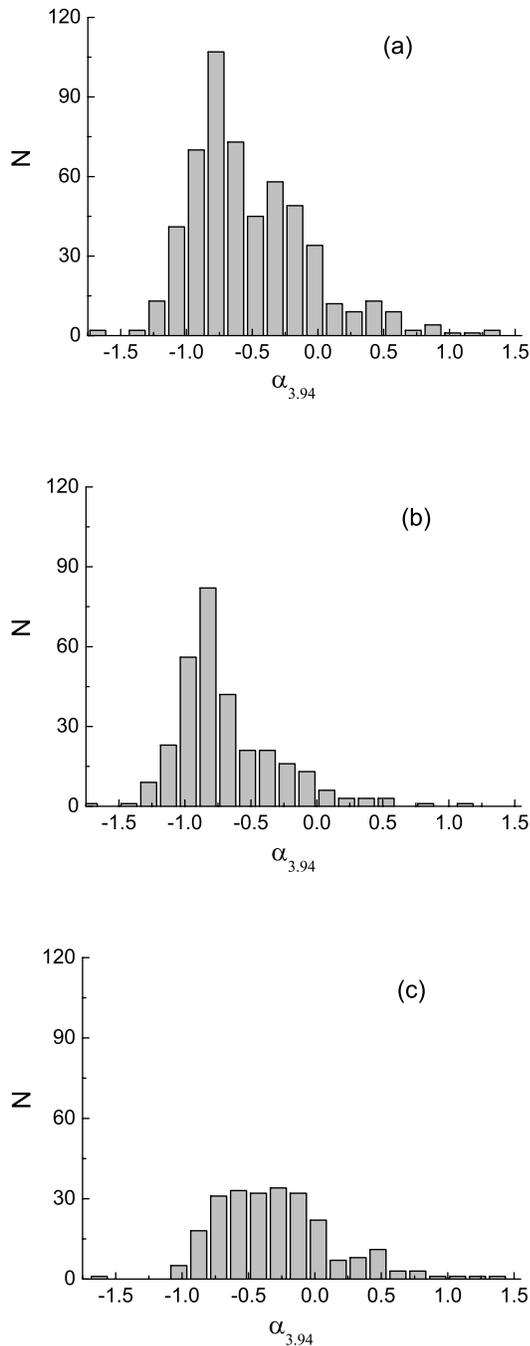


Рис. 7. Гистограммы распределения спектральных индексов на частоте 3.94 ГГц: (a) — для всех источников RCR-каталога, (b) — для источников первой группы, для которых имеются данные о плотностях потоков на трех и более частотах, (c) — для источников третьей группы, с известными плотностями потоков только на двух частотах.

Объекты, чьи антенные температуры $T_a \geq 5\sigma$ (Рис. 8(a)), имеют более ярко выраженный второй максимум в распределении спектральных индексов, чем объекты первой группы. Их распределение ближе к распределению второй группы — ярких объектов с хорошо изученными спектрами.

Также достаточно схожи распределения спектральных индексов объектов, чьи антенные температуры $3\sigma \leq T_a < 5\sigma$ и объектов третьей группы, имеющих спектральные данные на двух частотах. Такая схожесть вполне закономерна. Чем ниже порог чувствительности (3σ), тем более слабые источники мы выделяем на записи. При этом, правда, возникает опасность выделения ложных объектов.

Выборка источников, выделенных нами на уровне 3σ – 5σ лишь частично пересекается с выборкой объектов третьей группы. В ней больше объектов с крутыми спектрами ($\alpha_{3.94} < -0.75$), чем среди объектов третьей группы. А вот спектральное распределение в диапазоне $\alpha_{3.94} \geq 0$ практически совпадает.

На Рис. 9 показаны гистограммы распределения плотностей потоков источников всего списка RCR-каталога на частоте 3.94 ГГц (a), на (b) — источников второй, на (c) — источников первой и на (d) — третьей групп.

На Рис. 10 представлены гистограммы распределения плотностей потоков объектов, чьи антенные температуры на усредненных сканах $T_a \geq 5\sigma$ (a) и для источников, чьи T_a удовлетворяют условию $3\sigma \leq T_a < 5\sigma$ (b).

Плотности потоков источников первой и второй групп, а также источников с антенными температурами $T_a \geq 5\sigma$, лежат в диапазоне от 10 мЯн до нескольких Ян (на рисунках оси абсцисс ограничены 300 мЯн).

Плотности потоков источников с антенными температурами $3\sigma \leq T_a < 5\sigma$ также имеют достаточно большой разброс, от 10 до 200 мЯн. Но у основной доли этих объектов потоки 20–30 мЯн. Распределение плотностей потоков этой выборки объектов подобно распределению плотностей потоков объектов третьей группы. Отличие состоит в том, что все объекты третьей группы слабые, с плотностями потоков, не превышающими 60 мЯн на частоте 3.94 ГГц (Рис. 9(d)). Из них 95% имеют плотности потоков не превышающие 30 мЯн, причем преобладают источники с плотностями потоков 10–20 мЯн (около 85%).

Объяснить такое количество слабых объектов с плоскими и инверсионными спектрами легко, если рассмотреть Рис. 11, на котором представлены изменения ожидаемых плотностей потоков на волне 7.6 см в зависимости от спектрального индекса для объектов с различной плотностью потока на частоте 1.4 ГГц (NVSS-объекты).

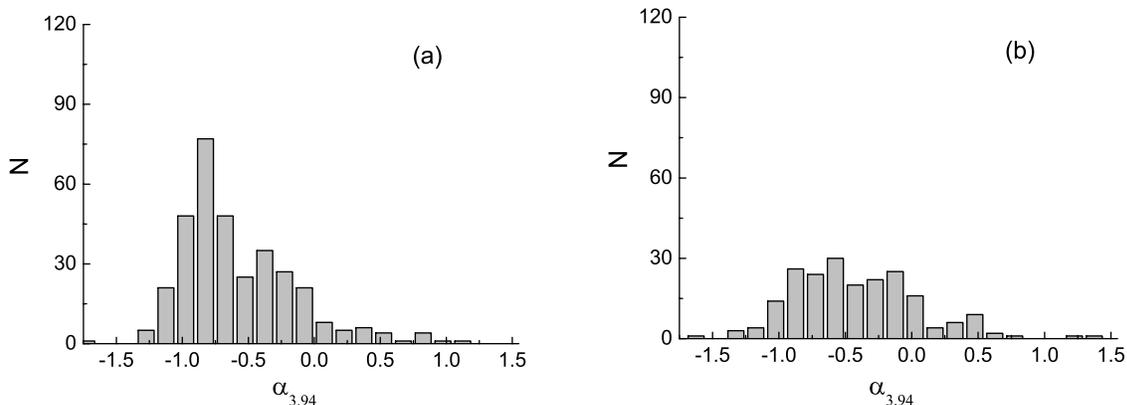


Рис. 8. Гистограммы распределения спектральных индексов на частоте 3.94 ГГц для источников с антенными температурами $T_a > 5\sigma$ (а) и с антенными температурами $3\sigma \leq T_a < 5\sigma$ (б).

Горизонтальные пунктирные линии на рисунке показывают возможность обнаружения объектов на уровне 3σ и 5σ при реализованной на РАТАН-600 чувствительности. Прямая 1 соответствует NVSS-объектам с плотностями потоков $F_{1.4} > 2.5$ мЯн, прямая 2 — $F_{1.4} > 10$ мЯн, прямая 3 — $F_{1.4} > 20$ мЯн, прямая 4 — $F_{1.4} > 50$ мЯн. Зависимости построены для центрального сечения обзора.

Из Рис. 11 следует, что по уровню 3σ на РАТАН-600 на волне 7.6 см можно было бы зарегистрировать самые слабые объекты NVSS ($2.5 \text{ мЯн} < F_{1.4} < 10 \text{ мЯн}$) с инверсионными спектральными индексами $\alpha > 1.5$ (популяция SSA (Synchrotron Self Absorption) объектов и объектов с чернотельным спектром).

Уровень 3σ в центральной полосе у нас близок к 10 мЯн, и, начиная с некоторой длительности накопления, он практически не зависит от дальнейшего накопления данных из-за эффекта насыщения. Так что можно ожидать, что при этом уровне обнаружения все NVSS-объекты с плотностями потоков $F_{1.4} > 20$ мЯн со спектральными индексами $\alpha > 0$, проходящие через центральное сечение нашего обзора, могут быть обнаружены и должны попасть в RCR-каталог.

Полноту нашего каталога мы определяли по отношению количества объектов RCR-каталога в заданной полосе $Dec_0 \pm \Delta Dec$ к числу источников NVSS-каталога в той же полосе для нескольких интервалов плотностей потоков NVSS-объектов: $F_{1.4} < 20$ мЯн (кривая 1 на Рис. 12), $20 \text{ мЯн} \leq F_{1.4} \leq 100 \text{ мЯн}$ (кривая 2 на Рис. 12), $F_{1.4} > 100$ мЯн (кривая 3 на рис. 12).

Из Рис. 12 следует, что полнота нашего каталога растет по мере увеличения плотностей потоков NVSS-объектов и сужения полосы обзора. Так,

в полосе $\Delta Dec = \pm 6'$ 90% источников RCR-каталога отождествлены с объектами NVSS, у которых плотности потоков $F_{1.4} \geq 100$ мЯн, 72% отождествлены с NVSS-объектами с потоками $20 \text{ мЯн} < F_{1.4} < 100 \text{ мЯн}$ и 16% — с NVSS-объектами, плотности потоков которых $F_{1.4} \leq 20$ мЯн. При расширении полосы обзора до $\Delta Dec = \pm 20'$ количество источников, отождествленных с NVSS-объектами, снижается, соответственно, до 70% ($F_{1.4} \geq 100$ мЯн), 37% ($20 \text{ мЯн} < F_{1.4} < 100 \text{ мЯн}$) и 6% ($F_{1.4} \leq 20$ мЯн) соответственно.

6. СПЕКТРЫ РАДИОИСТОЧНИКОВ RCR-КАТАЛОГА

Сразу отметим, что в рамках данной статьи мы не можем привести спектры всех радиоисточников нашего списка. Они будут представлены в отдельном отчете и на страничке <http://www.sao.ru/hq/len>. Здесь мы проведем классификацию полученных спектров и остановимся на наиболее значимых из них. Примеры спектров приведены далее.

Часть спектров имеет четкий максимум в диапазоне рассматриваемых частот. Источники с такими спектрами обозначены в Каталоге как hill, HFP или GPS (столбец 8).

Большинство NVSS-объектов в каталоге RCR, для которых плотности потоков известны на многих частотах, имеют стандартные степенные спектры со спектральными индексами в диапазоне $-1.12 < \alpha_{3.94} < -0.5$. Эти спектры хорошо аппроксимируются прямой.

Около 20% источников имеют степенной спектр с увеличением крутизны на высоких частотах (Рис. 13). Это обычно интерпретируется как

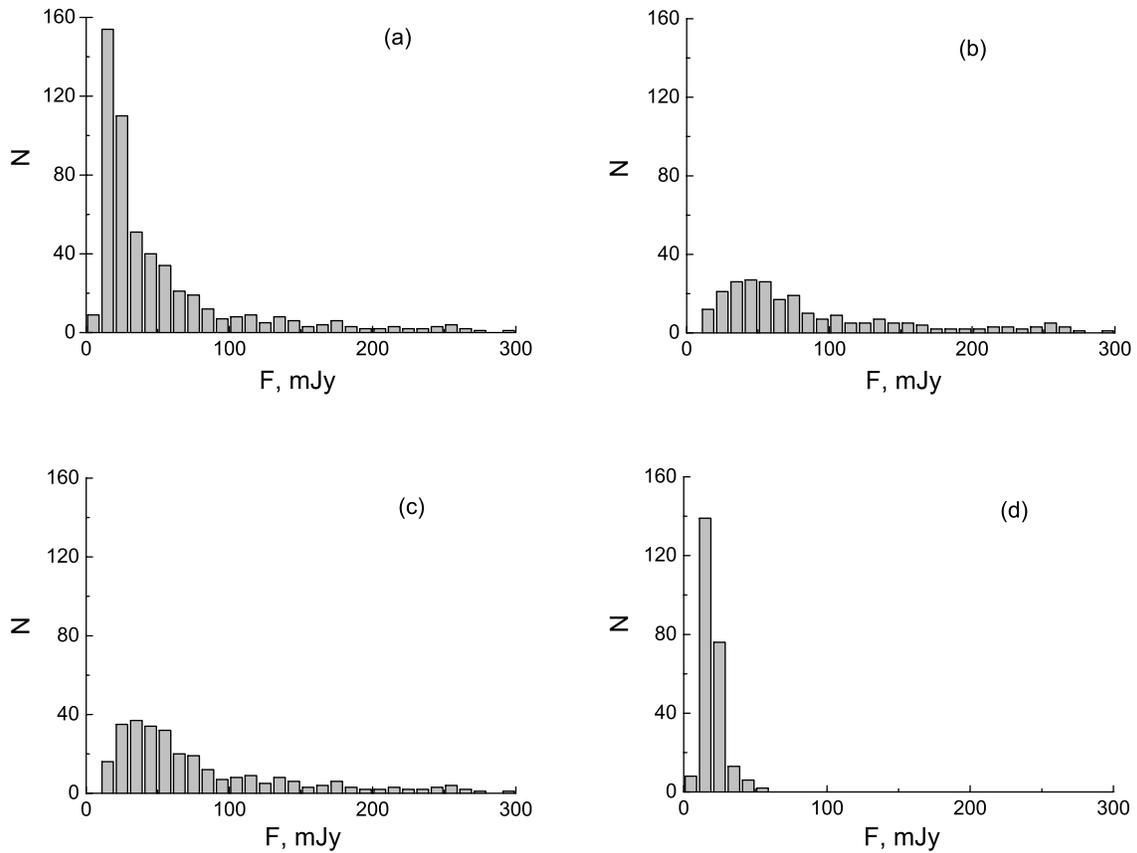


Рис. 9. Гистограммы распределения плотностей потоков на частоте 3.94 ГГц для всех источников RCR-каталога (а), для источников второй (б), первой (с) и третьей (д) групп.

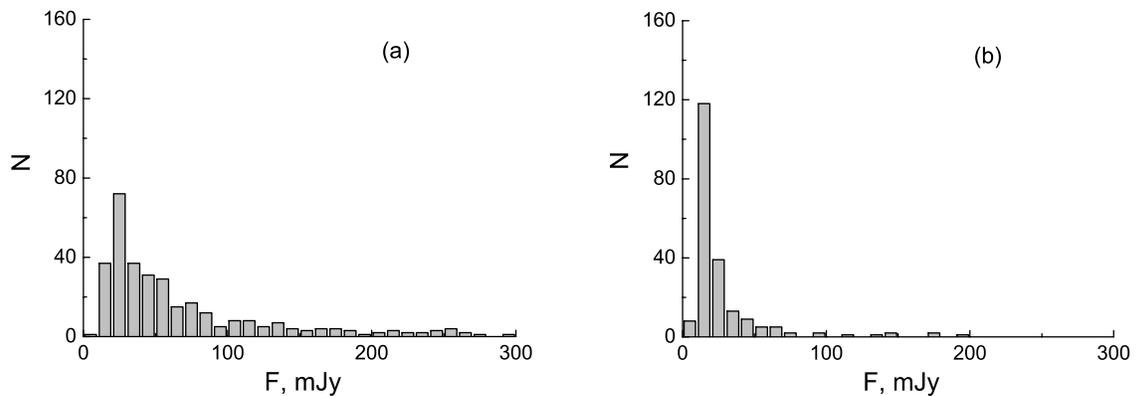


Рис. 10. Гистограммы распределения плотностей потоков на частоте 3.94 ГГц для источников с антенными температурами $T_a > 5\sigma$ (а) и антенными температурами $3\sigma \leq T_a < 5\sigma$ (б).

результат потери энергии высокоэнергичными релятивистскими электронами вследствие высвечивания.

Около 10% объектов имеют спектры с уплоще-

нием на высоких частотах (Рис. 14). Для большинства из них плотности потока известны только на трех частотах: 0.74 ГГц (VLSS), 1.4 ГГц (NVSS), 3.94 ГГц (RCR), причем плотности потоков на ча-

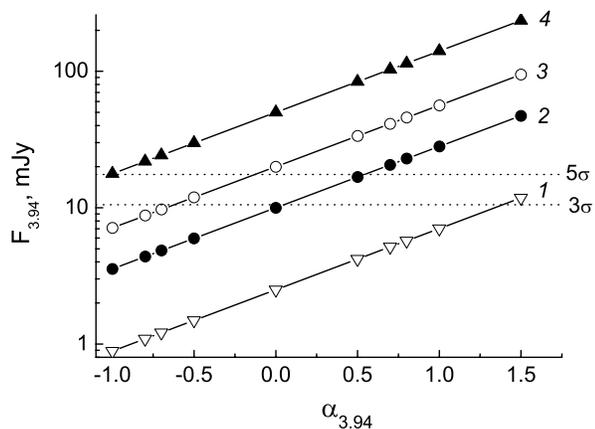


Рис. 11. Ожидаемые плотности потоков на волне 7.6 см для различных плотностей потоков объектов на частоте 1.4 ГГц (NVSS-объекты) в зависимости от спектрального индекса. Горизонтальные пунктирные линии показывают возможность обнаружения объектов по уровню 3σ и 5σ при реализованной на РАТАН-600 чувствительности. Прямая 1 соответствует NVSS-объектам с плотностями потоков $F_{1.4} > 2.5$ мЯн, прямая 2 — $F_{1.4} > 10$ мЯн, прямая 3 — $F_{1.4} > 20$ мЯн, прямая 4 — $F_{1.4} > 50$ мЯн. Зависимости построены для центрального сечения обзора.

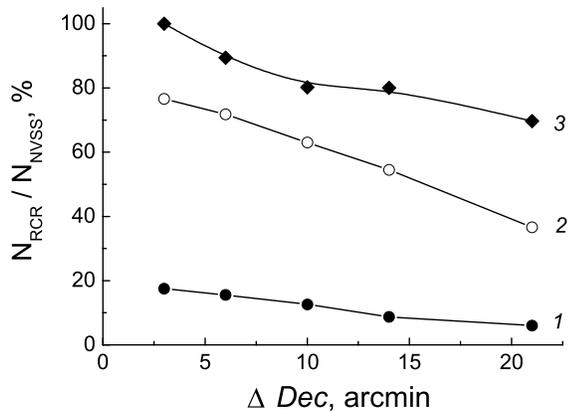


Рис. 12. Отношение количества объектов RCR-каталога в заданной полосе $Dec_0 \pm \Delta Dec$ к числу источников NVSS-каталога в той же полосе в зависимости от ширины полосы ΔDec для нескольких интервалов плотностей потоков NVSS-объектов: $F_{1.4} < 20$ мЯн (кривая 1), $20 \text{ мЯн} \leq F_{1.4} < 100$ мЯн (кривая 2), $F_{1.4} > 100$ мЯн (кривая 3).

стоте 0.74 ГГц часто только оценочные (по картам VLSS-обзора). Считается, что спектр таких источников — это результат наложения обычного степенного спектра от протяженных компонент радиоисточника и спектра от деталей малых угловых размеров (выбросов из ядра — джетов) с самопоглощением релятивистскими электронами на более

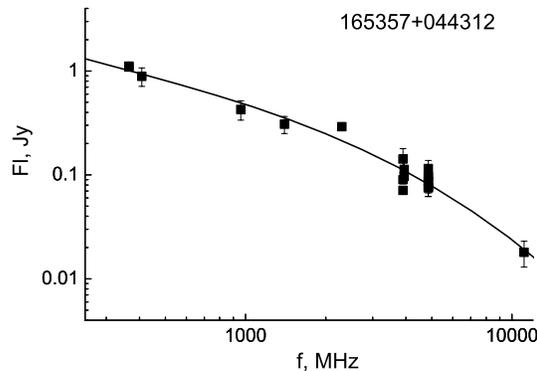
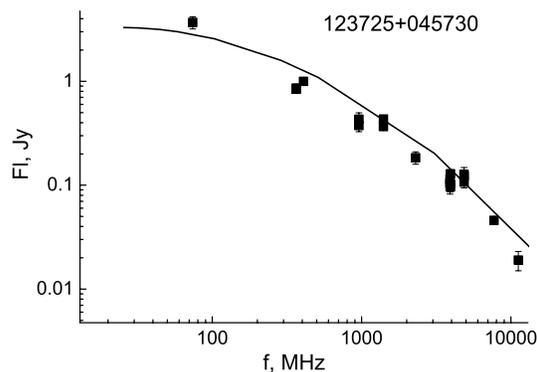
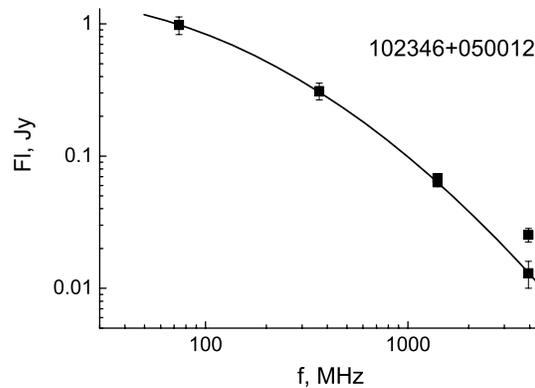


Рис. 13. Примеры спектров с увеличением крутизны на высоких частотах.

высоких частотах. В принципе возможен и вариант, когда протяженные компоненты имеют различные спектры (например, крутой плюс плоский). Однако обычно у протяженных компонент спектры близкие, и поэтому такой вариант маловероятен.

Как сказано выше, большинство объектов имеют степенные спектры с $\alpha_{3.94}/\alpha_{0.5} = 1$. На Рис. 15, где нанесены спектральные индексы источников $\alpha_{3.94}$ относительно $\alpha_{0.5}$, эти источники ложатся на прямую $\alpha_{3.94}/\alpha_{0.5}$. Число источников с линейным спектром около 160. Число источников, имеющих

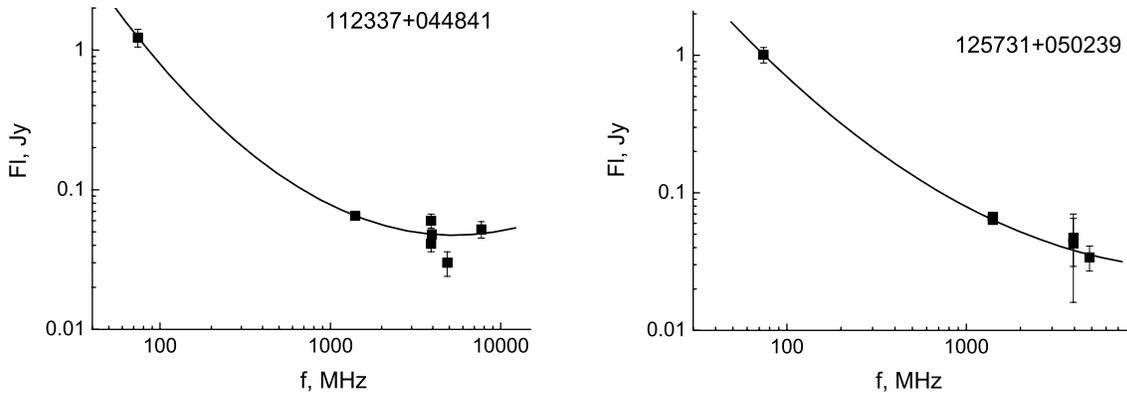


Рис. 14. Примеры спектров с увеличением крутизны на низких частотах.

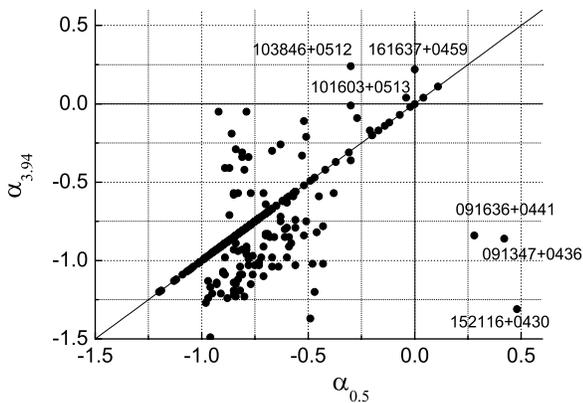


Рис. 15. Спектральные индексы радиисточников каталога $\alpha_{3.94}$ относительно $\alpha_{0.5}$.

спектры с увеличением крутизны спектра на высоких частотах, около 70, на низких частотах — порядка 25. На Рис. 15 в области отрицательных спектральных индексов первые располагаются ниже прямой $\alpha_{3.94}/\alpha_{0.5}$, вторые — выше.

Четвертый тип спектров — это спектры с четким максимумом на частотах от 0.5 ГГц до 12 ГГц. Примеры таких спектров показаны на Рис. 16 и 17. В литературе компактные источники с максимумами в спектре разделяются на три группы: CSS (Compact Steep Spectrum) — с максимумами на частотах до 0.5 ГГц, GPS (Gigahertz Peak Spectrum) — с максимумами в диапазоне от 0.5 ГГц до 5 ГГц и HFP (High Frequency Spectrum) — с максимумами на частотах выше 5 ГГц. Считается, что источники с максимумом в спектре — это либо молодые объекты, либо блазары [26–28].

В RCR-каталоге можно указать 19 объектов, имеющих четвертый тип спектра. Небольшая часть из них (6 источников) имеет спектр, образованный

наложением степенного спектра на низких частотах на спектр с самопоглощением на частотах от 0.5 до 12 ГГц.

Два объекта (из этих 6) с таким видом спектра являются хорошо изученными радиисточниками².

В работе Даллакаса и др. [31] GPS-радиисточник 152114+043020 (или 4C +04.51) отождествлен с галактикой ($z = 1.3$) с компактной двойной структурой на масштабах парсека. В статье Стангеллини и др. [32] он отнесен к квазарам. Максимум в спектре находится на частоте 1 ГГц; звездная величина $m_r = 21.2^m$.

Объект 161637+045932 из списка ярких HFP-источников [33] — это квазар с красным смещением $z = 3.22$, размером $0.76''$, $m_r = 19.3^m$ и максимумом в спектре на частоте примерно 5 ГГц. В работе Тинти и др. [28] его относят, скорее, к блазарам, чем к молодым объектам.

Для остальных четырех источников мы не обнаружили информации в литературе, приписывающей их по форме спектра к какой-либо выборке. Это два звездообразных объекта — 114631+045818 (размер в радиодиапазоне $2.27''$, максимум на частоте примерно 5 ГГц, $m_r = 19.9^m$) и 101940+044359 (размер $3.36''$, $m_r = 20.1^m$) и две галактики — 125755+045917 ($90''$, $m_r = 19.1^m$) и 091636+044132 ($94.2''$, $m_r = 16.8^m$, $z=0.18$). Спектры источников 101940+044359, 152114+043020, 161637+045932 приведены на Рис. 17.

Для других объектов с максимумами в спектре плотности потоков на низких частотах пока

²Угловые размеры радиисточников мы указываем по данным каталога FIRST [29], а звездные в фильтре r по данным обзора SDSS [30]. Мы приводим параметр — размер большой оси эллипса, определенной из гауссовой модели радиисточника.

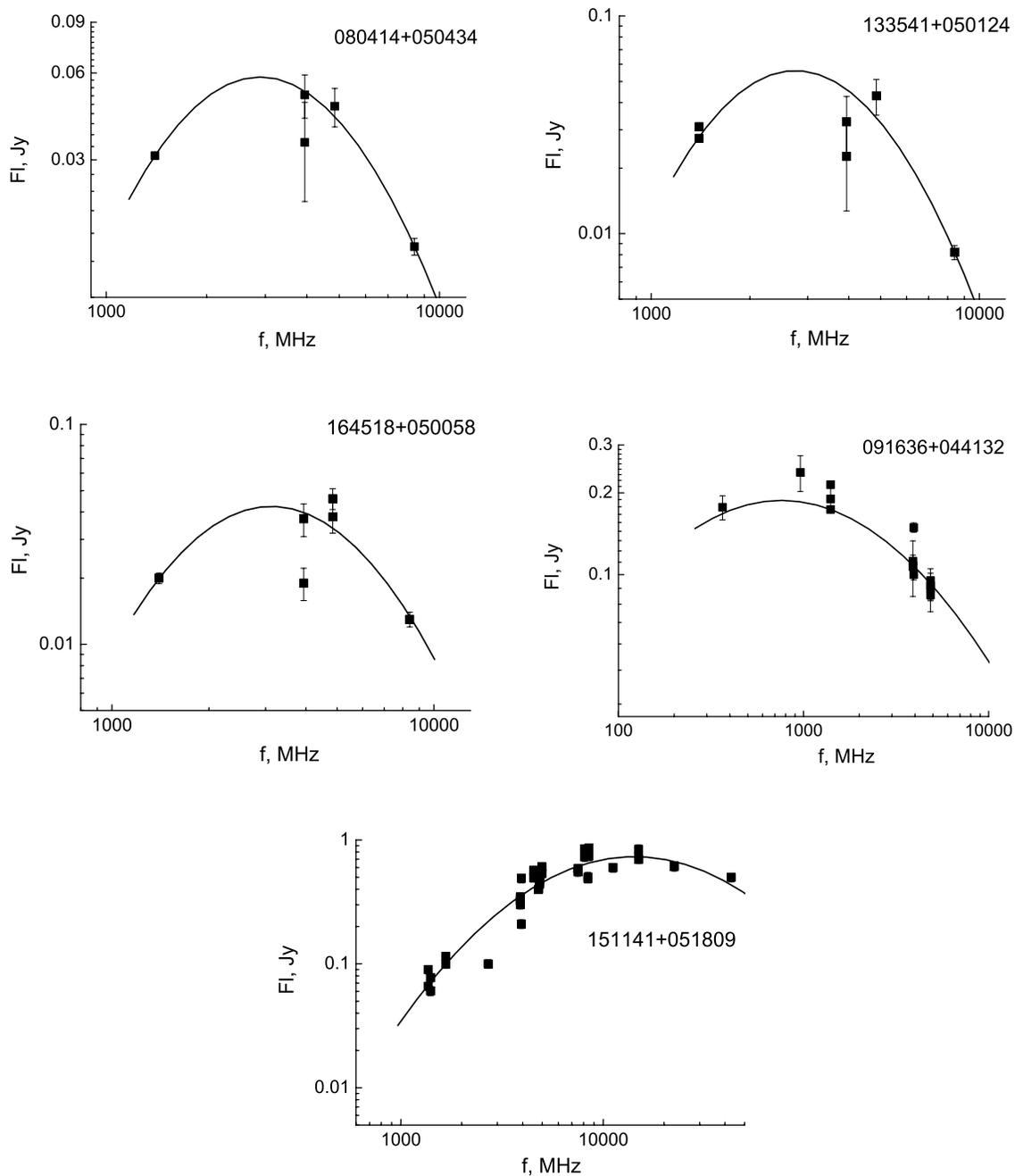


Рис. 16. Примеры спектров с максимумом на некоторой частоте. В Каталоге (колонка 8) они обозначены как GPS.

неизвестны. Один из таких источников, а именно 151141+051809, имеет максимум спектра на частоте примерно 12 ГГц с плотностью потока 1 Ян и является еще одним источником типа HFP [28, 33]. Это близкая яркая ($m_r = 16.3^m$) галактика типа Sy1 с красным смещением $z=0.08$.

Остальные объекты четвертой группы слабее. Положение максимума в их спектрах колеблется от 1.4 до 8 ГГц. В оптическом диапазоне эти источники

отождествляются как с квазарами и звездообразными объектами, так и с галактиками. Только один из них оказался в пустом поле (EF). Для квазаров и ярких близких галактик известны спектроскопические красные смещения. Один из таких объектов, 154418+045822 (RX J15442+0458), размером $1.54''$, ($r_m = 18.3^m$) является блазаром [34].

В австралийском каталоге южного неба на частоте 20 ГГц [35] количество объектов четвертого

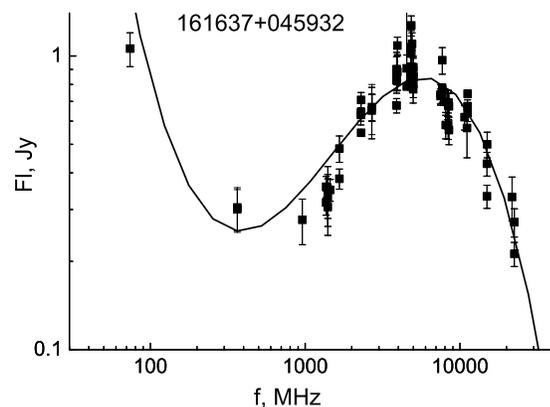
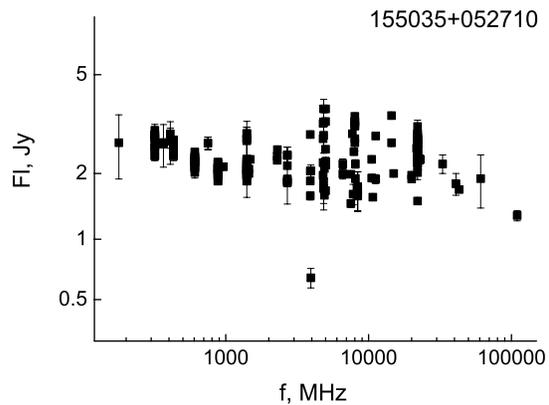
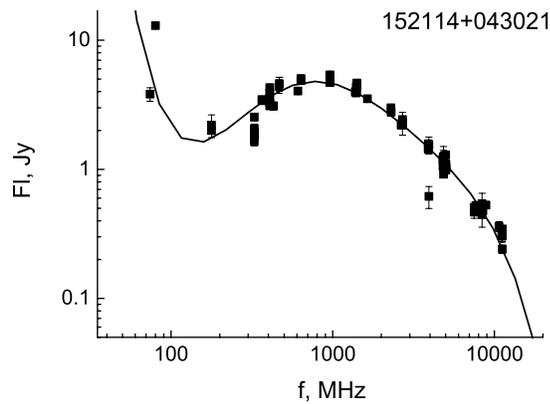
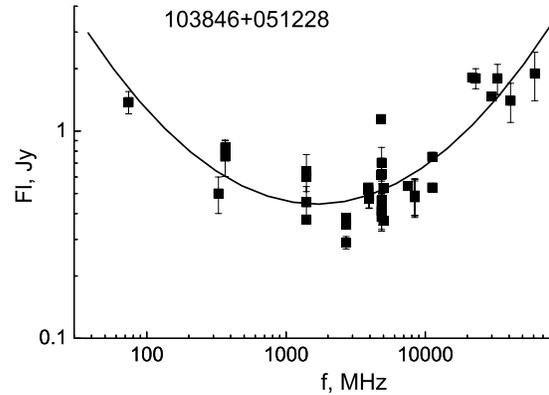
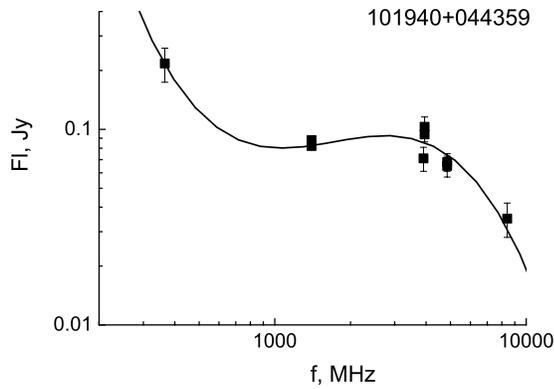


Рис. 17. Примеры спектров образованных наложением степенного спектра на спектр с самопоглощением на частотах от 0.5 ГГц до 12 ГГц. Объекты со спектрами типа спектра источника 101940+044359 в Каталоге (8 столбец) помечены как “hill” (верхний рисунок).

типа с максимумом в спектре в диапазоне частот 4–8 ГГц превышает 20% от общего числа источников. Уровень обнаружения каталога 0.5 Ян. В работе [36] использовались данные наблюдений австралийского телескопа на частотах 4.8 и 8.6 ГГц,

Рис. 18. Спектр с минимумом на некоторой частоте (верх) и спектр переменного источника (низ).

а также данные других каталогов на частотах 1.4 ГГц и 0.84 ГГц. Процент источников четвертого типа, полученный в этом каталоге [36] в несколько раз (порядка пяти) больше, чем в нашем каталоге. Эффект селекции как в RCR-каталоге, так и в австралийском каталоге не позволяет объяснить это расхождение.

Четыре радиоисточника RCR-каталога (103846+051229, 112417+045144, 115347+045858 и 133921+050159) имеют спектры, которые хорошо аппроксимируются параболой с минимумом в диапазоне частот 1.4–4.8 ГГц. На Рис. 18 (верх) приведен спектр источника 103846+051229. Это тройной (по данным FIRST) звездообразный объект ($m_r = 19.1^m$) со слабой оболочкой на изображении SDSS-обзора.

Источник 112417+045144 состоит из ядра с выбросом и попадает в пустое поле. Тройной источник 115347+045858 отождествляется с близкой галактикой $z=0.23$, $m_r = 17.2^m$. Точечный источник 133921+050159 отождествляется с квазаром $z=1.36$, $m_r = 19.1^m$. У этих трех источников вклад ядра в общий поток излучения существенен.

Источники, у которых в спектре наблюдается минимум, называются в литературе *upturn* [37]. В работе Туччи и др. [38] приводятся результаты исследования спектральных свойств источников почти полной выборки VSA-источников (ярче 10 мЯн на частоте 15 ГГц) в диапазоне 1.4–33 ГГц.

Оказалось, что у большинства источников с крутыми спектрами на частотах 1.4–5 ГГц спектры становятся плоскими с ростом частоты, а доля источников с растущим спектром на частотах свыше 5 ГГц в выборке составляет 19%. В нашем списке первые составляют 10%, а вторые (*upturn*) — только 0.01%.

Может быть, такой класс источников будет регистрироваться в будущих наблюдениях СМВ (Cosmic Microwave Background) с высоким разрешением [38].

На Рис. 18 (низ) приводится пример спектра переменного источника (*var*). По имеющимся данным 7 источников мы отнесли к переменным. Все они имеют плоский спектр. Источник 073357+045614, возможно, переменный. Он имеет инверсионный спектр. В основном это источники с доминирующим излучением ядра, которые отождествляются с квазарами, а некоторые (083148+042938 [39], 123932+044305 [40] и 142409+043451 [41]) относятся к блазарам. 101603+051303 входит в список HPF [33].

Как отмечалось выше, примерно для половины объектов RCR-каталога имеются данные о плотностях потоков только на двух частотах — 1.4 и 3.94 ГГц (плюс оценочные данные по GB6 и VLSS-картам). Это слабые объекты с плотностями потоков в основном меньше 30 мЯн (Рис. 9b). Около 30% из них имеют степенной спектр со спектральным индексом от -1 до -0.5 ; порядка 45% имеют плоский спектр и 25% — инверсионный. Последние, возможно, могут иметь максимум на частотах выше 10 ГГц.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате наблюдений на РАТАН-600 лосы неба на склонении $Dec \sim 5^\circ$ в диапазоне прямых восхождений $7^h \leq R.A. < 17^h$ в период 1987–1999 гг., а также переобработки данных обзора “Холод” (1980–1981 гг.) был получен список (RCR-каталог) из 550 объектов, отождествленных с объектами NVSS-каталога. Из них 18 бленд и 15 двойных источников. Обработка данных проводилась двумя независимыми методами.

Определены плотности потоков, прямые восхождения и спектральные индексы каждого из

объектов списка, построены гистограммы распределения спектральных индексов и плотностей потоков различных выборок источников³.

Для построения спектров привлекались все известные каталоги, доступные с помощью ресурсов CATS, Vizier и NED, а также оценки плотностей потоков, полученные по картам VLSS и GB6-обзоров. Эти оценки были полезны прежде всего при построении спектров источников, для которых имелись данные о плотностях потоков только на двух частотах: 3.94 ГГц (RCR) и 1.4 ГГц (NVSS). Таких источников в RCR-каталоге оказалось около 50% от всего списка (245 объектов).

В основном это источники с плотностями потоков, не превышающими 30 мЯн, около 65% из них имеют плоский или инверсионный спектры ($\alpha > -0.5$). Гистограммы распределений плотностей потоков и спектральных индексов, а также средний спектральный индекс этой выборки источников подвержены эффекту селекции, так как объекты с крутыми спектрами не регистрируются из-за ограниченной чувствительности.

Проведен анализ надежности полученных результатов. Показано, что использование двух разных методов обработки позволяет получить более точные результаты как при определении прямых восхождений, так и плотностей потоков источников. Поэтому мы считаем, что методика независимой обработки данных наблюдений себя оправдала.

В заключение отметим, что исследование спектральных индексов в сантиметровом диапазоне тесно связано с проблемой исключения эффектов селекции. Для этого, то есть для полного анализа спектров объектов в глубоких дециметровых обзорах неба (NVSS [5], FIRST [29]), чувствительность на сантиметровых волнах должна быть на 1–2 порядка выше, чем в дециметровых обзорах, т.е. не хуже десятков микроянских. Такую чувствительность в сантиметровом диапазоне пока удалось реализовать только на очень малых площадках неба.

Обзоры неба на РАТАН-600 [2, 17] проводятся для получения более полной информации о спектральных индексах в дециметровом диапазоне радиоисточников и являются промежуточным звеном между глубокими обзорами VLA и обзорами всего неба низкой чувствительности. Основной и важный вывод таких обзоров заключается в том, что объектов, не попавших в дециметровые каталоги, по крайней мере, на уровне 10–15 мЯн, в этом диапазоне прямых восхождений мы не обнаружили.

Девяносто процентов источников RCR-каталога, отождествленных с объектами NVSS, и имеющих

³Склонения радиоисточников не определялись — использовались склонения объектов каталога NVSS.

плотности потоков $F_{1.4} \geq 100$ мЯн, лежат в полосе обзора $\Delta Dec = \pm 6'$. В этой же полосе 72% источников с плотностями потоков $20 \text{ мЯн} < F_{1.4} < 100$ мЯн отождествлены с NVSS-объектами, 16% — с NVSS-объектами с $F_{1.4} \leq 20$ мЯн. При расширении полосы обзора до $\Delta Dec = \pm 20'$ количество источников, отождествленных с NVSS-объектами снижается, соответственно, до 70%, 37% и 6%.

Таким образом, пока все сантиметровые обзоры, включая “Холод” и RZF, дают для слабой и основной по численности популяции NVSS-объектов информацию в основном об объектах с самопоглощением SSA (BLlac, QSR, AGN). Новая эпоха в этой области ожидается с вступлением в строй ALMA на миллиметрах и SKA на волнах около 1 см.

Каталог радиисточников размещен по адресу <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/cat?J/AstBu/65/42>.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ №08-02-00486а, №09-07-00320 и проекта “Научные школы” Российской Академии Наук. Благодарим А. И. Копылова за критические замечания к каталогу RC.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, N. M. Lipovka, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **87**, 1 (1991).
- Ю. Н. Парийский и Д. В. Корольков, *Итоги Науки и Техники. Серия Астрономия*, ред. Р. А. Сюняев (ВИНИТИ, Москва, 1986) **31**, 73 (1986).
- А. Б. Берлин, Е. В. Булаенко, В. Я. Гольнев и др., *Письма в АЖ* **7**, 290 (1981).
- Yu. N. Parijskij and D. V. Korolkov, *Sov. Sci. Rev. Astrophys. Space Rhys.* **5**, 39 (1986).
- J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., *Astronom. J.* **115**, 1693 (1998).
- R. L. White, R. H. Becker, D. J. Helfand, and M. D. Gregg, *Astrophys. J.* **475**, 479 (1997).
- О. П. Желенкова, Кандидатская диссертация по физико-математическим наукам (САО РАН, Нижний Архыз, 2007).
- Н. С. Соболева, Н. Н. Бурсов и А. В. Темирова, *Астрон. ж.* **83**, 387 (2006).
- Н. А. Есепкина, Н. Л. Кайдановский, Б. В. Кузнецов и др., *Радиотехника и электроника* **6**, 1947 (1961).
- Н. А. Есепкина, Н. С. Бахвалов, Б. А. Васильев и др., *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)* **11**, 182 (1979).
- Н. А. Есепкина, Б. А. Васильев, И. А. Водоватов и М. Г. Высоцкий, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)* **11**, 197 (1979).
- E. K. Majorova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **53**, 78 (2002).
- E. K. Majorova and S. A. Trushkin, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **54**, 89 (2002).
- E. K. Majorova and N. N. Bursov, *Astrophysical Bulletin* **62**, 398 (2007).
- Skyview, <http://skyview.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/skvbasic.pl>.
- E. K. Majorova, *Astrophysical Bulletin* **63**, 56 (2008).
- Н. Н. Бурсов, Ю. Н. Парийский, Е. К. Майорова и др., *Астрон. ж.* **84**, 1 (2007).
- Н. С. Соболева, А. В. Темирова и Н. Н. Бурсов, *Отчет СПбФ САО №2* (2008).
- G. Miley and C. De Breuck, *astro-ph/0802.2770*
- O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *In Astronomical Data Analysis Software and Systems VI, Ed. by G. Hunt and H. E. Payne. ASP Conference Series* **125**, 322 (1997). (<http://cats.sao.ru>).
- O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 118 (2005).
- F. Ochsenbein, P. Bauer, and J. Marcout, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **143**, 23 (2000).
- NED, <http://nedwww.ipac.caltech.edu/>.
- A. S. Cohen, W. M. Lane, W. D. Cotton, et al., *Astronom. J.* **134**, 1245 (2007).
- P. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas and J. J. Condon, *Astrophys. J. Suppl.* **103**, 427 (1996).
- C. P. O’Dea, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific (PASP)* **110**, 493 (1998).
- S. Tinti and G. De Zotti, *Astronom. and Astrophys.* **445**, 889 (2006).
- S. Tinti, D. Dallacasa, G. De Zotti, et al, *Astronom. and Astrophys.* **432**, 31 (2005).
- R. H. Becker, D. J. Helfand, and R. L. White, *Astronom. J.* **475**, 479 (1997).
- J. K. Adelman-McCarthy et al., *Astrophys. J. Suppl.* **175**, 297 (2008).
- D. Dallacasa, M. Bondi, W. Alef, and F. Mantovani, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **129**, 219 (1998).
- C. P. Stanghellini et al., *Astronom. and Astrophys.* **443**, 891 (2005).
- D. Dallacasa, C. Stanghellini, M. Centoza, and R. Fanti, *Astronom. and Astrophys.* **363**, 887 (2000).
- S. A. Laurent-Muehleisen et al., *Astronom. J.* **525**, 127 (1999).
- M. Massaridi, R. D. Ekers, T. Murphy, et al., *astro-ph/0709.3485*.
- M. Massaridi, R. D. Ekers, T. Murphy et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* (in press).
- W. A. Dent and F. T. Haddock, *Nature* **205**, 487 (1965).
- M. Tucci, J. A. Rubio-Martin, R. Rebolo et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **386**, 1729 (2008).
- B. Sbarufatti, A. Treves, and R. Falomo, *Astronom. J.* **635**, 173 (2005).
- G. Nandikotkur et al., *Astronom. J.* **657**, 706 (2007).
- P. S. Chen, H. W. Fu, and Y. F. Gao, *New Astronomy* **11**, 27 (2005).

RATAN-600 7.6-CM DEEP SKY STRIP SURVEYS AT THE DECLINATION OF THE SS433 SOURCE DURING THE 1980–1999 PERIOD. DATA REDUCTION AND THE CATALOG OF RADIO SOURCES IN THE RIGHT-ASCENSION INTERVAL $7^h \leq \text{R.A.} < 17^h$

N. S. Soboleva, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, A. V. Temirova, N. N. Bursov

We use two independent methods to reduce the data of the surveys made with RATAN-600 radio telescope at 7.6 cm in 1988–1999 at the declination of the SS433 source. We also reprocess the data of the “Cold” survey (1980–1981). The resulting RCR (RATAN COLD REFINED) catalog contains the right ascensions and fluxes of objects identified with those of the NVSS catalog in the right-ascension interval $7^h \leq \text{R.A.} < 17^h$. We obtain the spectra of the radio sources and determine their spectral indices at 3.94 and 0.5 GHz. The spectra are based on the data from all known catalogs available from the CATS, Vizier, and NED databases, and the flux estimates inferred from the maps of the VLSS and GB6 surveys. For 245 of the 550 objects of the RCR catalog the fluxes are known at two frequencies only: 3.94 GHz (RCR) and 1.4 GHz (NVSS). These are mostly sources with fluxes smaller than 30 mJy. About 65% of these sources have flat or inverse spectra ($\alpha > -0.5$). We analyze the reliability of the results obtained for the entire list of objects and construct the histograms of the spectral indices and fluxes of the sources. Our main conclusion is that all 10–15 mJy objects found in the considered right-ascension interval were already included in the decimeter-wave catalogs.

Key words: *radiosources*