

УДК 524:520.27-13

О ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ДАННЫМ ОБЗОРОВ “ХОЛОД”, ПРОВОДИВШИХСЯ НА РАТАН-600

© 2012 Е. К. Майорова, О. П. Желенкова

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 16 апреля 2012 года; принята в печать 15 мая 2012 года

В работе предпринята попытка оценить возможность обнаружения переменных источников по данным обзоров, проводившихся на РАТАН-600 в период 1980–1994 гг. на волне 7.6 см. Отобранные по определенным критериям объекты RCR-каталога использовались для построения калибровочных кривых. С их помощью выполнена оценка точности построения кривых и получены среднеквадратичные ошибки определения плотностей потоков источников. Для проверки калибровочных источников на наличие среди них переменных проведены количественные оценки ряда параметров, характеризующих переменность, в частности индекса долговременной переменности V и вероятности p по критерию χ^2 . Из порядка 80 калибровочных источников у 14 индекс долговременной переменности оказался положительной величиной, что может указывать на их возможную переменность. Наиболее вероятными кандидатами в переменные оказались три источника с вероятностью по критерию $\chi^2 p > 0.95$. У пяти вероятность составила $0.85 < p < 0.95$, у остальных шести — $0.6 < p < 0.8$. Девять из 14 объектов, возможно, переменны и в оптическом диапазоне. Построены кривые блеска и спектры возможно переменных источников и ряда “непеременных” объектов. Результаты работы предполагается использовать в дальнейшем при поиске переменных радиисточников по данным серии обзоров “Холод”.

Ключевые слова: *методы: анализ данных—обзоры—радиоконтинуум: галактики—галактики: активные*

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача изучения переменности космических объектов ставилась уже при подготовке первых глубоких поисковых обзоров на РАТАН-600, а именно, обзора “Холод” [1] и Зеленчукского обзора [2]. Выборки радиисточников, полученные в Зеленчукском обзоре на частотах 3.9 и 7.5 ГГц [3–5], послужили основой для первых исследований переменных источников на РАТАН-600. Результаты изучения их статистических характеристик были представлены в работе [6].

Начиная с 1998 г. на Северном секторе радиотелескопа проводились длинные сети многочастотных наблюдений для исследования переменных объектов. Продолжительность непрерывных ежедневных наблюдений одних и тех же источников составляла от одного до трех месяцев. В основном исследовались дискретные яркие радиисточники с плоскими спектрами. Такие источники обладают переменностью с характерными временными масштабами от десятков минут до десятков лет. Результаты этих многолетних исследований представлены в многочисленных работах, выполненных

сотрудниками ГАИШ, САО РАН, АКЦ ФИАН, например [7–13].

В настоящей работе мы рассмотрим возможность обнаружения переменных радиисточников по данным глубоких обзоров, которые проводились на Северном секторе РАТАН-600 с 1980 по 1999 гг.

Для этого по выборке калибровочных источников, отобранных по определенным критериям, будут построены калибровочные кривые и детально оценены ошибки определения плотностей потоков.

Для количественных оценок возможной переменности исследуемых объектов будет использовано несколько критериев, в том числе и статистические. Для источников, заподозренных в переменности, а также для ряда “непеременных” объектов будут построены кривые блеска.

2. ГЛУБОКИЕ ОБЗОРЫ НА РАТАН-600

В 1980 году на Северном секторе РАТАН-600 в эксперименте “Холод” был проведен первый глубокий обзор неба на частоте 3.94 ГГц [1, 14] на склонении источника SS 433. Практически в то

же время на Южном секторе с плоским отражателем проводился многочастотный “Зеленчукский обзор” [3, 4].

Начиная с 1998 г. на Северном секторе проводился многоволновый ($\lambda = 1-55$ см) околосенитный RZF-обзор [15, 16]. С 2001 г. обзор проводился на девяти, а с 2006 г. — на 17 сечениях.

По данным обзора “Холод” был получен каталог радиоисточников (RC-каталог) с уровнем обнаружения порядка 10 мЯн [17, 18]. С 1987 по 1999 гг. с целью уточнения плотностей потоков и координат источников RC-каталога на Северном секторе радиотелескопа было проведено еще несколько циклов наблюдений на той же частоте и склонении ($Dec_{1980} = 4^{\circ}57'$).

Результаты обработки этих наблюдений опубликованы в работах [16, 19, 20]¹. В работе [21] представлены результаты, полученные с использованием повторно обработанных записей эксперимента “Холод-80” в диапазоне $7^h \leq RA < 17^h$. Список объектов, выделенных в этой полосе и отождествленных с объектами NVSS-каталога [24] приводится в RCR-каталоге (RATAN Cold Refined).²

В процессе обработки данных наблюдений этих обзоров было выявлено, что величины плотностей потоков ряда источников меняются от цикла к циклу. Поскольку в работе не ставилась задача исследования радиоисточников на наличие переменности, их плотности потоков усреднялись по всем циклам наблюдений. Именно эти усредненные величины с погрешностями приведены в RCR-каталоге [21].

В настоящей работе мы попытаемся проанализировать, возможно ли обнаружение переменных радиоисточников в поисковых обзорах.

Для решения поставленной задачи мы будем использовать данные обзоров, проводившихся на волне 7.6 см в 1980, 1988, 1993 и 1994 гг. на склонении $Dec_{1980} = 4^{\circ}57'$ в диапазоне $7^h \leq RA < 17^h$. Уровень обнаружения (или средние значения $\overline{3\sigma}$) в этих обзорах составляли: 8.0 ± 0.5 мЯн для обзора 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. ($H = 51^{\circ}22'$)³ [21] (H — угол места, на который выставлялась антенна при проведении обзора).

¹ В работе [16] дается полный список опубликованных по этой тематике работ.

² Спектры источников RCR-каталога представлены на сайте <http://www.sao.ru/hq/len/RCR/>.

³ В 1994 г. антенна устанавливалась не только на склонение источника SS 433, но и примерно на $4'$ выше ($H = 51^{\circ}22'$) или ниже ($H = 51^{\circ}09'$) этого склонения.

Обзоры 1990, 1991 и 1999 гг., которые проводились на той же волне и склонении, в настоящей работе рассматриваться не будут, как менее чувствительные. К ним мы вернемся позднее.

Определенным преимуществом использования обзоров при изучении переменности радиоисточников является то, что антенна в процессе проведения обзора сфокусирована на определенную высоту H (склонение центрального сечения обзора Dec_0) и ее конфигурация в процессе наблюдений практически не меняется.

Это уменьшает ошибки, связанные с перестановкой антенны, что особенно важно при определении плотностей потоков достаточно слабых источников. При изучении переменных объектов в режиме, описанном в работе [13], осуществляются многократные перестановки антенны для наведения ее на различные участки неба.

Еще одним преимуществом поисковых обзоров является то, что в силу особенностей диаграммы направленности (ДН) РАТАН-600 в его поле зрения при одном прохождении полосы неба попадает одновременно большое количество источников.⁴

Чем больше чувствительность телескопа и время накопления, тем большее число прошедших через ДН источников можно выделить на записях. Время накопления определяется количеством повторных прохождений данной полосы неба (сканов).

В рассматриваемых обзорах число прохождений наблюдаемой полосы неба составляло от 20 до 35 записей в зависимости от обзора и часа наблюдений. В программах, описанных в работе [13], каждый источник наблюдался от трех до шести раз.

Таким образом, многократное прохождение одной и той же полосы неба в обзорах не только увеличивает количество объектов, но и позволяет исследовать более слабые источники, чем в режиме, описанном в работе [13].

Отметим, что по данным рассматриваемых обзоров мы можем исследовать долговременную переменность радиоисточников на масштабах нескольких лет, которая, как известно, является следствием нестационарных процессов в активных ядрах галактик.

3. ВЫБОР КАЛИБРОВОЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Основной задачей данной работы является получение калибровочных кривых, с помощью которых можно вычислять потоки источников, и оценка ошибок определения плотностей потоков.

⁴ При одном суточном прохождении неба на волне $\lambda 7.6$ см через ДН РАТАН-600 в пределах огибающей щита проходит более 30 000 радиоисточников [24].

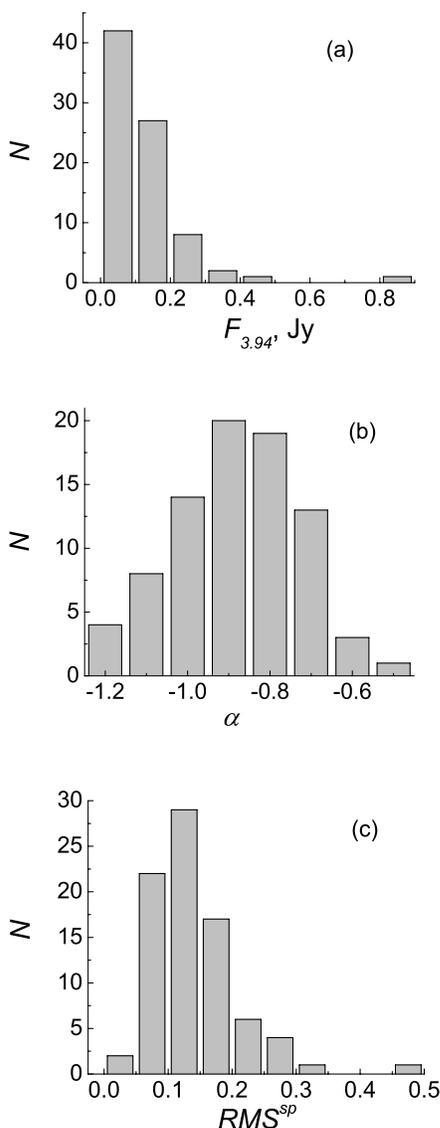


Рис. 1. Гистограммы распределения калибровочных источников: по плотностям потоков (а), по спектральным индексам (b) и по величинам среднеквадратичной ошибки разброса точек на спектрах калибровочных источников (с).

Для построения калибровочных кривых нами были отобраны RCR-радиоисточники с крутыми и хорошо изученными спектрами, для которых имеются данные о плотностях потока на нескольких частотах. Выбирались достаточно яркие объекты с минимальным разбросом точек на спектре.

Среди радиоисточников с крутыми спектрами достаточно редко наблюдается переменность на частотах больше 1 ГГц. Однако, она встречается у тех объектов, где обнаруживается компактная компонента, которая и отвечает за вариации потока [22, 23]. Известные переменные источники, у

которых в основном плоские спектры, в выборку не включались.

Нами было отобрано 75 источников с плотностями потоков $F_{3.94} > 40$ мЯн и еще 6, у которых $F_{3.94} \sim 30$ мЯн. ($F_{3.94}$ — плотность потока на частоте 3.94 ГГц.) Отметим, что количество калибровочных источников несколько менялось от обзора к обзору.

На Рис. 1 представлены гистограммы распределения калибровочных источников: по плотностям потоков $F_{3.94}$ — (а), по спектральным индексам α — (b) и по величине относительной среднеквадратичной ошибки разброса точек на их спектрах RMS^{sp} — (с).

Среднеквадратичная ошибка разброса точек на спектре RMS^{sp} относительно аппроксимирующей кривой нормировалась к плотности потока источника на частоте 3.94 ГГц. Аппроксимирующая прямая (или парабола) вписывалась методом наименьших квадратов.

Большинство выбранных источников имеет спектральный индекс⁵ $\alpha_{3.94} < -0.75$ ($F_f \sim f^\alpha$) и среднеквадратичную ошибку разброса точек на спектре $RMS^{sp} < 20\%$.

Среднее значение RMS^{sp} составило $\overline{RMS^{sp}} = 0.12 \pm 0.06$ по всей выборке калибровочных источников. Величина ошибок определения плотностей потоков источников на разных частотах по данным используемых каталогов лежит в диапазоне от 6% до 28%. Их среднее значение по всей выборке калибровочных источников — $15\% \pm 0.03\%$.

Большая часть калибровочных источников по радиокартам FIRST являются двойными, меньшая — точечными, отождествляются они как с галактиками, так и с квазарами.

На Рис. 2 показаны гистограммы распределения по количеству частот, на которых имеются данные о плотностях потоков радиоисточников в их спектрах.

Гистограмма на левой панели учитывает только данные, имеющиеся в базе данных NED [25], на правой — все имеющиеся данные, собранные из разных каталогов, в том числе и из обзоров PATAH-600, а также оценки, полученные нами [21] по картам VLSS [26] и GB6-обзоров [27]. Из гистограмм видно, что у отобранных калибровочных источников данные о плотностях потоков имеются для четырех и более частот по данным NED, а с учетом данных других каталогов для подавляющего большинства источников имеются данные на 5–9 частотах.

⁵ $\alpha_{3.94}$ — спектральный индекс на частоте $f = 3.94$ ГГц.

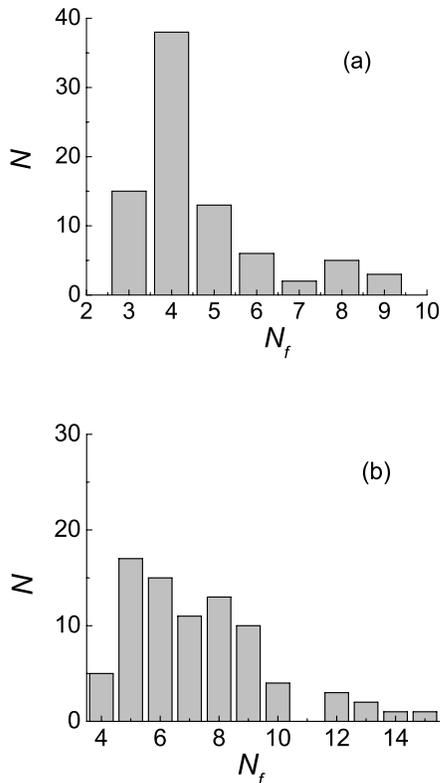


Рис. 2. Гистограммы распределения по количеству частот, на которых имеются данные о плотностях потоков радиоисточников в их спектрах. Слева показано распределение, полученное только по данным NED, справа — по всем имеющимся данным, собранным из разных каталогов, в том числе и полученным из обзоров на ПАТАН-600, а также по оценкам, полученным по картам VLSS и GB6-обзоров.

4. ПОСТРОЕНИЕ КАЛИБРОВОЧНЫХ КРИВЫХ И ОЦЕНКА ОШИБОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТЕЙ ПОТОКОВ ИСТОЧНИКОВ

Напомним некоторые особенности наблюдений на радиотелескопе ПАТАН-600, диаграмма которого существенно отличается от ДН параболоида [28–32]. В режиме наблюдений с одним сектором диаграмма направленности расширяется при удалении от ее центрального сечения. Соответственно, чем дальше проходит источник от этого сечения, тем шире отклик от него и слабее сигнал.

Одномерные сканы (или кривые прохождения) представляют собой суперпозицию источников, прошедших через различные горизонтальные сечения ДН.

Была проведена повторная обработка отобранных источников. В качестве исходного материала использовались осредненные записи многосуточных наблюдений, которые прошли первичную об-

работку [16]. После вычитания фона⁶ выделение источников на осредненных сканах проводилось с помощью гаусс-анализа. При обработке использовалось штатное программное обеспечение обработки радиоастрономических наблюдений [33].

Временные привязки осуществлялись по сильным источникам с использованием данных NVSS-каталога. Для каждого выделенного на записи источника определялись его антенная температура T_a^i , полуширина вписанной гауссианы $HPBW^i$ и прямое восхождение RA^i .

При обработке данных использовалась информация о величине выноса источника по склонению относительно центрального сечения обзора dH и полученные расчетным путем [31] зависимости $HPBW(dH)$, где $HPBW$ — полуширина вертикальной ДН, $dH = \Delta Dec = Dec^i - Dec^0$, Dec^i — склонение i -го источника, Dec^0 — склонение центрального сечения обзора. Сравнение полученных из гаусс-анализа полуширин источников $HPBW^i$ с зависимостями $HPBW(dH)$, проверенными экспериментально в работах [32, 34], позволяло контролировать надежность выделения этих объектов.

Для каждого из обзоров строились зависимости $F_{3.94}^i/T_a^i$ от dH . Здесь $F_{3.94}^i$ — плотность потока калибровочного источника на частоте 3.94 ГГц, T_a^i — его антенная температура. Плотность потока $F_{3.94}^i$ находилась из аппроксимирующей кривой спектра данного источника, T_a^i — из осредненной записи обзора посредством гаусс-анализа. На Рис. 3 кружками показаны отношения $F_{3.94}^i/T_a^i$, построенные по данным обзоров 1980, 1988, 1993 и 1994 гг. (слева направо и сверху вниз). Сплошные линии — расчетные калибровочные кривые $A/k_{DN}(dH)$, где $k_{DN}(dH)$ — диаграммный коэффициент. Он является вертикальной ДН радиотелескопа F_v , если первичный облучатель располагается в фокусе антенны, и зависимостью максимальных значений ДН в различных горизонтальных сечениях от величины выноса этого сечения от центрального в случае, если поперечный вынос облучателя из фокуса не равен нулю.

Диаграммный коэффициент $k_{DN}(dH)$ для каждого из обзоров рассчитывался с помощью алгоритмов, описанных в работе [31]. Его величина показывает, насколько ослабляется отклик от источника при удалении его от центрального сечения обзора (или центрального сечения ДН).

При расчете $k_{DN}(dH)$ учитывалась величина поперечного выноса первичного облучателя (рупора). Наибольший вынос рупора из фокуса был при

⁶Фон проводился с “окном сглаживания” 80 сек., чтобы не занижать сигнал от далеких от центрального сечения источников [21].

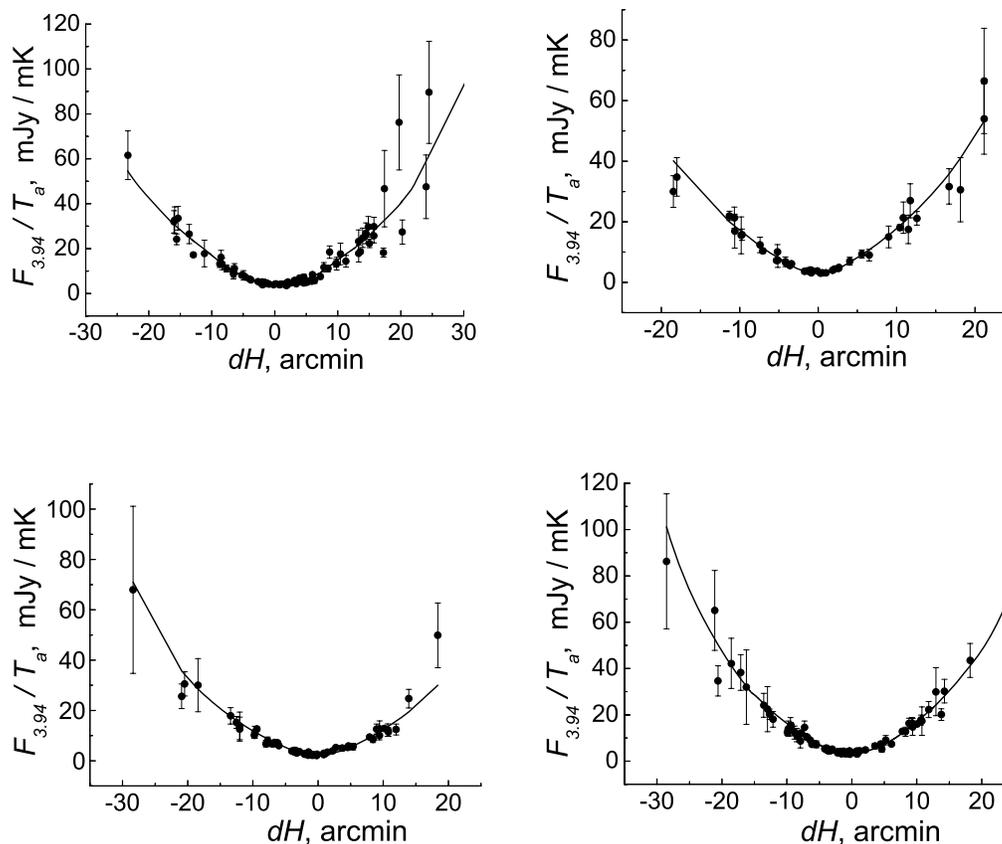


Рис. 3. Зависимости $F_{3.94}/T_a$ от dH (кружки) для обзоров 1980, 1988, 1993 и 1994 гг. (слева направо и сверху вниз), построенные по выборке калибровочных источников и расчетные кривые $A/k_{DN}(dH)$ (сплошные линии).

проведении обзора “Холод” в 1980 г., в 1988 г. рупор помещался в фокусе антенны.

В отличие от расчетов, выполненных в работах [21, 35], в настоящей работе коэффициент $k_{DN}(dH)$ для обзора 1980 г. рассчитывался не только с учетом поперечного выноса рупора, но и с учетом выноса его вдоль направления, составляющего с горизонтом 50° , а также с учетом небольшого продольного выноса. Дополнительные выносы из фокуса были сделаны для уменьшения шумовой температуры антенны в эксперименте “Холод”. Учет их при расчете коэффициента $k_{DN}(dH)$ позволил согласовать расчетные и экспериментальные данные, в частности выявленный в работе [35] сдвиг экспериментальной вертикальной ДН от расчетной примерно на $1'$.

Для каждого из обзоров подбиралось такое значение коэффициента A^7 , чтобы относитель-

ная среднеквадратичная ошибка RMS^k разброса экспериментальных точек $F_{3.94}^i/T_a^i$ относительно расчетной калибровочной кривой $A/k_{DN}(dH)$ была минимальна.

$$RMS^k = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \left(\frac{F_{3.94}^i/T_a^i - A/k_{DN}}{A/k_{DN}} \right)^2},$$

где N — число источников, используемых при построении калибровочной кривой данного обзора.

В настоящей работе мы несколько отошли от методики, используемой в работах [19, 21, 34]. В них калибровочные кривые — это кривые вписанные в экспериментальные точки $F_{3.94}^i/T_a^i$ методом наименьших квадратов.

В работе [35] было показано, что экспериментальные вертикальные ДН радиотелескопа $F_v(dH) = k_{DN}(dH) = A/F_{3.94}^i/T_a^i$, полученные по данным обзоров 1980–1999 гг. хорошо согласуются с расчетными. Поэтому в качестве калибровочной кривой мы использовали отношение A/k_{DN} . Коэффициент k_{DN} рассчитывался

⁷Коэффициент A есть ни что иное, как отношение $A = 2k/S_{\text{эф}}$, где k — постоянная Больцмана, $S_{\text{эф}}$ — эффективная площадь радиотелескопа.

Таблица 1. Усредненные относительные среднеквадратичные ошибки RMS^k ($\overline{RMS^k}$)

	1980 г.	1988 г.	1993 г.	1994 г.
$-30' < dH < 30'$	0.197	0.123	0.175	0.139
$-15' < dH < 15'$	0.139	0.107	0.154	0.132
$-10' < dH < 10'$	0.141	0.100	0.153	0.132
$-5' < dH < 5'$	0.109	0.078	0.164	0.135
$T_a > 10\sigma$	0.127	0.096	0.165	0.127

с учетом условий наблюдений, а коэффициент A подбирался таким образом, что бы величина RMS^k была минимальной. Оказалось, что в этом случае средняя по всему диапазону изменения dH ошибка RMS^k оказывается меньше, чем ошибка разброса экспериментальных точек относительно аппроксимирующей кривой (полинома второй или четвертой степени), вписанной методом наименьших квадратов.

Сравнение калибровочных кривых, полученных для обзора 1988 г. в настоящей работе и в работе [19], показало, что в диапазоне $-10' < dH < 10'$ они практически совпадают. С ростом абсолютной величины dH кривые начинают расходиться и при $dH \sim 20'$ значения $F_{3.94}^i/T_a^i$ из работы [19] превышают полученные нами в 1.4 раза.

Это может быть связано как с набором калибровочных источников, так и с методикой обработки, в частности, с проведением и вычитанием фона. Последнее особенно критично при оценке параметров удаленных от центрального сечения источников. При вычитании на записях фона, полученного с “окном сглаживания” порядка 20 сек., значения антенных температур далеких источников оказываются заниженными, что приводит к росту величины $F_{3.94}^i/T_a^i$ с ростом dH .

Есть и еще одна причина, по которой мы пользовались расчетными зависимостями $A/k_{DN}(dH)$, а не аппроксимирующими кривыми. Это исключение влияния переменных источников, если таковые окажутся в выборке калибровочных источников.

Средние значения относительной среднеквадратичной ошибки RMS^k ($\overline{RMS^k}$), рассчитанные для обзоров 1980, 1988, 1993 и 1994 гг., приведены в Табл. 1. Усреднение проводилось во всем рассматриваемом диапазоне углов dH , в диапазонах $-15' < dH < 15'$, $-10' < dH < 10'$ и $-5' < dH < 5'$. Там же приводятся значения $\overline{RMS^k}$, усредненные по выборке источников, у которых антенные температуры на записях превышают $10\sigma_s$.

Таблица 2. Усредненные относительные среднеквадратичные ошибки отношения F_i/T_{a_i} ($\overline{RMS^{FTa}}$)

	1980 г.	1988 г.	1993 г.	1994 г.
$-30' < dH < 30'$	0.165	0.186	0.181	0.187
$-15' < dH < 15'$	0.156	0.178	0.171	0.181
$-10' < dH < 10'$	0.142	0.170	0.156	0.167
$-5' < dH < 5'$	0.128	0.132	0.144	0.145
$T_a > 10\sigma$	0.128	0.131	0.139	0.131

Отметим, что значения $\overline{RMS^k}$ для всего рассматриваемого диапазона dH близки к среднеквадратичной ошибке разброса точек экспериментальной вертикальной ДН относительно расчетной, полученной в работе [35] для выборки источников с плотностями потоков $F_{3.94} > 50$ мЯн. Величина $\overline{RMS^k}$ для обзора 1980 г. оказалась меньше, чем приведенная в [35], что можно объяснить учетом дополнительных выносов рупора из фокуса при расчете диаграммного коэффициента $k_{DN}(dH)$.

Для оценок относительных среднеквадратичных ошибок отношения $F_{3.94}^i/T_a^i$ и его доверительных интервалов (Рис. 3) использовались относительные среднеквадратичные ошибки разброса точек на спектрах источников RMS^{sp} и относительные среднеквадратичные ошибки определения антенных температур $RMS^{Ta} = \sigma_s/T_a^i$, где σ_s — дисперсия шума на записях прохождения полосы неба в данном обзоре.

Отметим, что если среднеквадратичные ошибки разброса точек на спектрах RMS^{sp} достаточно равномерно распределены относительно угла dH , то ошибки определения антенных температур RMS^{Ta} существенно зависят от удаленности источника от центрального сечения обзора. В качестве примера на Рис. 4 показаны зависимости RMS^{Ta} от dH — (а) и RMS^{sp} от dH — (б), построенные по выборке калибровочных источников, наблюдавшихся в обзоре 1980 года. Относительные среднеквадратичные ошибки отношения $F_{3.94}^i/T_a^i$ ($\overline{RMS^{FTa}}$) также растут с увеличением абсолютной величины угла dH (Рис. 4с). В Табл. 2 приведены величины усредненных относительных среднеквадратичных ошибок отношения $F_{3.94}^i/T_a^i$. Усреднение проводилось в диапазонах изменения dH , указанных в первой колонке таблицы.

Сравнение данных, приведенных в Табл. 1 и Табл. 2, показывает, что величины ошибок разброса экспериментальных точек $F_{3.94}^i/T_a^i$ относительно калибровочной кривой $A/k_{DN}(dH)$ ($\overline{RMS^k}$) оказались меньше или сопоставимы с

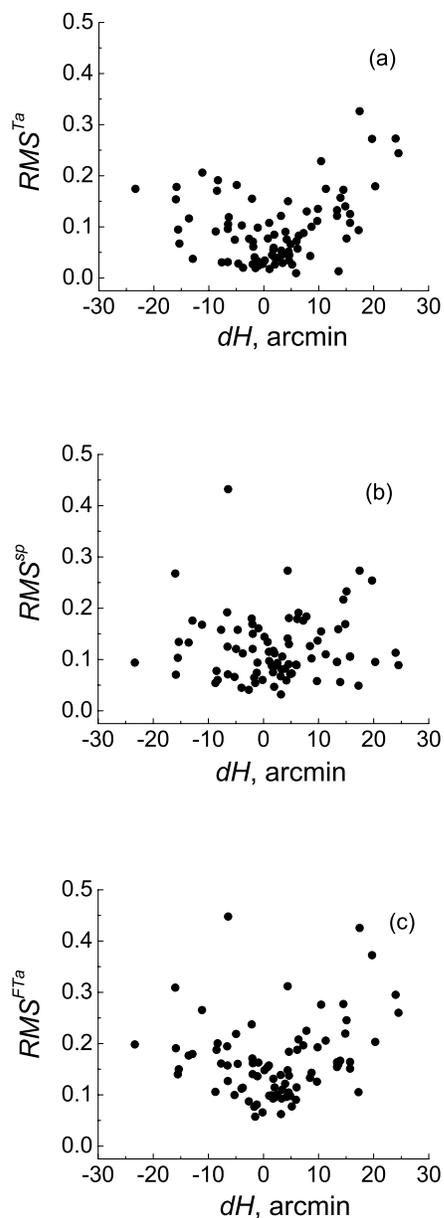


Рис. 4. Зависимости $RMS^{Ta}(dH)$ (a), $RMS^{sp}(dH)$ (b) и $RMS^{FTa}(dH)$ (c), построенные для калибровочных источников по данным обзора 1980 г.

величинами усредненных относительных среднеквадратичных ошибок отношения $F_{3.94}^i/T_a^i$. Исключение составили усредненные во всем рассматриваемом диапазоне dH значения \overline{RMS}^k обзора 1980 г. и усредненные в диапазоне $-5' < dH < 5'$ значения \overline{RMS}^k обзора 1993 г. В случае обзора 1980 г. исключение из рассмотрения всего лишь одного источника, J103938+051031, имеющего наибольшее отклонение от расчетной кривой,

снижает величину \overline{RMS}^k до значения 0.168, что сопоставимо с величиной \overline{RMS}^{FTa} в диапазоне $-30' < dH < 30'$.

Выводы, которые можно сделать из анализа приведенных на Рис. 3 зависимостей и данных Табл. 1, сводятся к тому, что большинство рассмотренных нами калибровочных источников имеют значения $F_{3.94}^i/T_a^i$, близкие к значениям A/k_{DN} для соответствующего угла dH , так что разница между ними не превышает величины доверительного интервала отношения $F_{3.94}^i/T_a^i$. В основном эти источники лежат в диапазоне изменения $dH = \pm 15' - \pm 17'$.

При большей удаленности источников от центрального сечения обзора ($|dH| > 17'$) отклонения экспериментальных точек от кривой A/k_{DN} возрастают, как, впрочем, и величина ошибок отношения $F_{3.94}^i/T_a^i$. Наиболее сильно это проявляется в обзоре 1980 г. Эти отклонения могут быть связаны как с точностью выделения далеких от центрального сечения обзора источников на записях, так и с диаграммными эффектами. Нельзя полностью исключить и наличие в нашей выборке переменных объектов.

Усредненные среднеквадратичные ошибки разброса экспериментальных точек относительно расчетной кривой \overline{RMS}^k минимальны в обзорах 1988 г. (при $-15' < dH < 15'$) и 1980 г. (при $-5' < dH < 5'$): 8% и 11% соответственно. В диапазоне $-15' < dH < 15'$ ошибки \overline{RMS}^k обзоров 1980 г., 1993 г. и 1994 г. составляют примерно 14%, 15% и 13%.

В заключение приведем зависимости отношения $G = (F_{3.94}^i/T_a^i)/(A/k_{DN})$ от dH . Они показаны на Рис. 5 (слева направо и сверху вниз, соответственно, для обзоров 1980, 1988, 1993 и 1994 г.). Горизонтальные линии — значения $G = 1 \pm \pm 3\overline{RMS}^k$.

Из приведенных графиков видно, что отклонения экспериментальных точек от расчетных кривых, за исключением трех точек в обзоре 1980 г. и двух точек в обзоре 1993 г. не превышает $3\overline{RMS}^k$. Они достаточно равномерно распределены во всем диапазоне изменения углов dH . Наименьшие отклонения экспериментальных точек от расчетных, как уже отмечалось, наблюдаются в обзоре 1988 г.

Источники, для которых отношения $F_{3.94}^i/T_a^i$ более чем на $\pm 3\overline{RMS}^k$ расходятся с расчетной кривой, могут оказаться переменными. Это источники J103938+051031, J110246+045916, J114220+045459, J121852+051447 и J142104+050843.

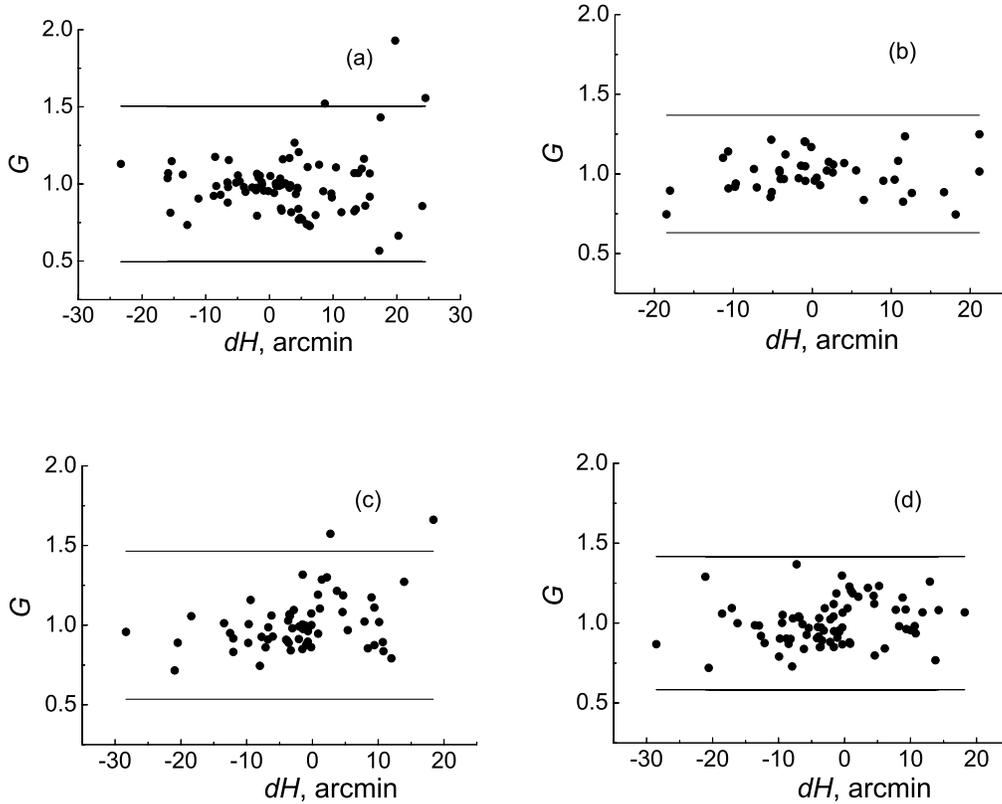


Рис. 5. Зависимости отношения $G = (F_i/T_{a_i})/(A/k_{DN})$ от dH по данным обзоров 1980, 1988, 1993 и 1994 гг. (слева направо и сверху вниз). Горизонтальные линии — значения $G = 1 \pm 3\overline{RMS}^k$.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫБОРКИ КАЛИБРОВОЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ НА НАЛИЧИЕ СРЕДИ НИХ ПЕРЕМЕННЫХ

Отбирая для построения калибровочных кривых источники с крутыми спектрами, мы старались уменьшить вероятность попадания в нашу выборку переменных источников. Однако полностью исключить наличие таких объектов в нашем списке нельзя.

Для проверки калибровочных источников на переменность мы проведем ряд количественных оценок, в частности, оценим величины коэффициентов V_R [36], V_F [37] и индекса долговременной переменности V [13].

Расчет коэффициентов проводился по формулам:

$$V_R = F_i/F_j, \tag{1}$$

$$V_F = \frac{F_i - F_j}{\sqrt{(\sigma_i^2 + \sigma_j^2)}}, \tag{2}$$

$$V = \frac{(F_i - \sigma_i) - (F_j + \sigma_j)}{(F_i - \sigma_i) + (F_j + \sigma_j)}, \tag{3}$$

где F_i, F_j — плотности потоков данного источника, полученные в обзорах i -го и j -го циклов, σ_i, σ_j — абсолютные среднеквадратичные ошибки определения плотностей потоков ($i, j = 80, 88, 93, 94$).

Последние два критерия учитывают погрешности определения плотностей потоков, поэтому их можно считать более надежными для проверки источников на переменность.

Плотности потоков вычислялись по формуле:

$$F = \frac{A}{k_{DN}} T_a. \tag{4}$$

При этом использовались значения антенных температур источников T_a , полученные из осредненных записей обзора i -го года и соответствующие расчетные кривые $A/k_{DN}(dH)$.

Абсолютная σ_i и относительная RMS_i среднеквадратичные ошибки определения плотности потока источника в i -ом обзоре рассчитывались по

Таблица 3. Коэффициенты V , V_F и V_R

RA_{2000} DEC_{2000} RCR (1)	V (2)	V_F (3)	V_R (4)	\bar{F} , mJy (5)	σ^{set} , mJy (6)	RMS^{set} (7)	dH_1 , arcmin (8)	dH_2 , arcmin (9)	α (10)
J 103938.62+051031.3	0.264	3.13	2.53	184	70	0.381	19.74	13.78	-0.68
J 155148.09+045930.5	0.125	2.53	1.75	79	25	0.312	6.13	2.20	-1.17
J 142104.21+050845.0	0.092	2.33	1.79	183	53	0.293	17.25	11.83	-0.79
J 132448.14+045758.8	0.088	1.85	1.50	65	13	0.233	7.23	1.26	-1.03
J 135137.56+043542.0	0.084	2.13	1.59	392	99	0.262	-15.36	-18.46	-0.89
J 110246.51+045916.7	0.082	2.18	1.57	102	26	0.260	5.56	2.75	-0.81
J 074239.34+050704.3	0.077	2.17	1.56	350	74	0.211	-9.40	-12.90	-0.85
J 121328.89+050009.9	0.076	1.76	1.51	72	15	0.213	6.52	-0.39	-1.07
J 101515.53+045305.6	0.061	2.16	1.41	124	18	0.147	-0.88	-3.73	-1.04
J 112437.45+045618.8	0.057	1.95	1.45	466	84	0.180	5.88	-0.17	-0.87
J 104551.72+045552.9	0.035	1.51	1.31	157	17	0.111	5.17	2.09	-0.99
J 134243.57+050431.5	0.008	1.70	1.35	973	134	0.138	13.58	7.76	-0.72
J 140730.77+044934.9	0.007	1.53	1.55	82	18	0.216	-7.12	-7.28	-0.75
J 121852.16+051449.4	0.007	1.48	1.72	237	60	0.267	21.17	18.38	-0.67

формулам:

$$RMS_i = \sqrt{(RMS^k)^2 + (RMS^{Ta})^2}, \quad (5)$$

$$\sigma_i = F_i RMS_i. \quad (6)$$

Коэффициенты V_R , V_F и V вычислялись для всех калибровочных источников, у которых плотности потоков определены как минимум в трех обзорах. При расчете использовались значения среднеквадратичных ошибок RMS^k , приведенные в Табл. 1. Заподозренными в переменности считались источники, у которых индекс долговременной переменности оказался положительной величиной ($V > 0$). У таких источников разность плотностей потоков, определенная в разных обзорах, превышала суммарное значение среднеквадратичных ошибок в этих обзорах.

Из всей рассмотренной выборки калибровочных источников у 14 индекс переменности V оказался положительной величиной хотя бы для одной пары обзоров. В Табл. 3 приведены величины коэффициентов V , V_R и V_F этих объектов (колонки 2, 3 и 4), их средние значения плотностей потоков

\bar{F} (колонка 5) и среднеквадратичные отклонения от среднего σ^{set} (колонка 6).

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_i^n F_i, \quad (7)$$

$$\sigma^{set} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (F_i - \bar{F})^2}, \quad (8)$$

n — число обзоров, в которых были определены плотности потоков источников.

Там же приводятся величины углов dH , при которых плотности потоков источников имеют максимальное (dH_1) и минимальное (dH_2) значения в рассматриваемых обзорах (колонки 6 и 7). Напомним, что вследствие прецессии склонения источников и величина dH менялись от обзора к обзору. В последнем столбце Табл. 3 приведены спектральные индексы этих объектов на частоте 3.94 ГГц.

На Рис. 6 показаны зависимости индекса переменности V от угла dH — (а), а также зависимости $V_R(dH)$ — (б) и $V_F(dH)$ — (с) для источников из Табл. 3. Приведенная на Рис. 6д зависимость

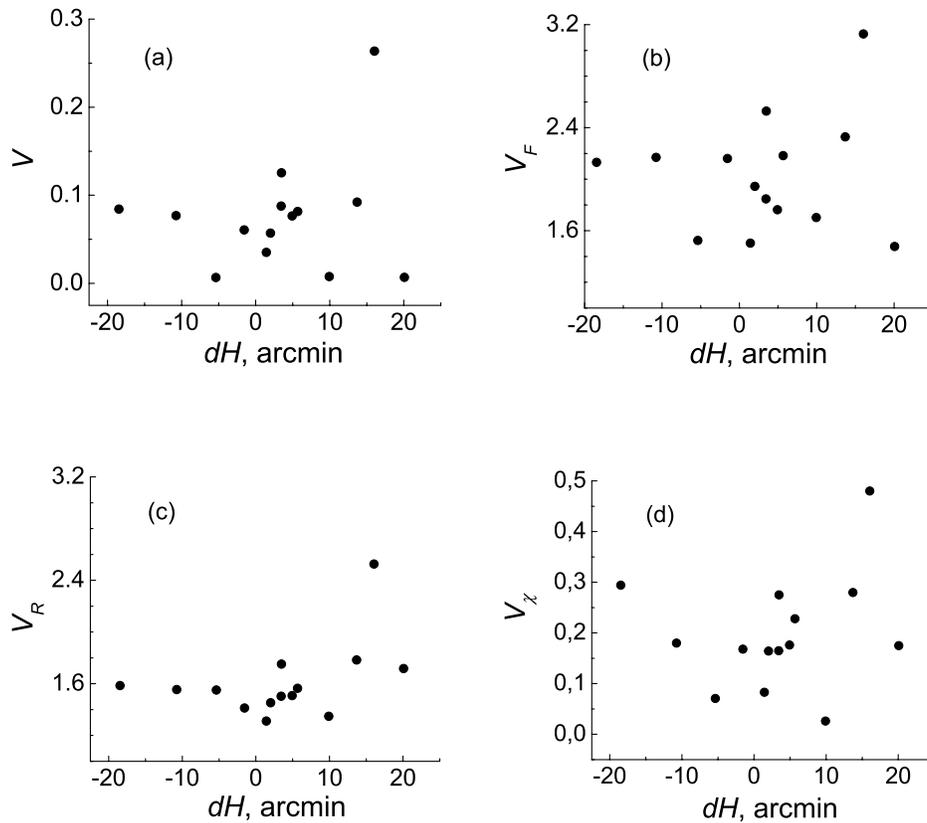


Рис. 6. Зависимости индексов переменности V — (a), V_R — (b), V_F — (c) и V_χ — (d) от угла dH для 14 заподозренных в переменности источников (Табл. 3 и 4).

$V_\chi(dH)$ будет рассмотрена в разделе 6. Как видно из приведенных графиков, радиоисточники достаточно равномерно распределены относительно центрального сечения обзора. Так же равномерно распределены они и по часам наблюдения (или прямому восхождению).

У десяти источников с положительным индексом долговременной переменности величина коэффициента $V_R > 1.5$, у четырех — лежит в диапазоне $1.3 < V_R < 1.5$. Для всех объектов из Табл. 3 величина коэффициента $V_F \gtrsim 1.5$.

В основном это достаточно яркие объекты с плотностями потоков $\bar{F} > 100$ мЯн, за исключением трех (J 121328+050009, J 132448+045758 и J 140730+044934), у которых \bar{F} лежит в диапазоне 50–100 мЯн. Последние достаточно близко проходят от центрального сечения обзора ($dH < 7'$) и при накоплении порядка 25 прохождений хорошо выделяются на осредненных записях.

В дополнение к уже выполненным расчетам мы оценили индекс долговременной переменности V , убрав небольшую систематику в разбросе точек

обзоров 1993 и 1994 гг. (Рис. 5). Для трех из 14 источников значения V стали отрицательными. Эти объекты, J 121852+051449, J 134243+050431, J 140730+044934, оказываются наименее вероятными кандидатами в переменные.

Вернемся к точностям определения плотностей потоков калибровочных источников и сравним относительные среднеквадратичные ошибки RMS^{set} , RMS^{sp} и RMS^F для двух подвыборок. Одна из них включает 14 заподозренных в переменности источников (Табл. 3), вторая — “непеременные” объекты, у которых $V < 0$.

RMS^{set} — относительное среднеквадратичное отклонение от среднего значения плотности потока \bar{F} , RMS^{sp} — относительная среднеквадратичная ошибка разброса точек на спектре источника или ошибка определения его плотности потока из аппроксимирующей кривой спектра, RMS^F — усредненная по всем обзорам относительная среднеквадратичная ошибка определения плотности потока.

$$RMS^{set} = \sigma^{set} / \bar{F}, \quad (9)$$

Таблица 4. Коэффициент V_χ и вероятность p

RA_{2000} DEC_{2000} RCR (1)	V_χ (2)	p (3)	$\langle F \rangle$, mJy (4)	$\langle \sigma \rangle$, mJy (5)	$\langle \sigma_{otn} \rangle$ (6)	ΔF , mJy (7)	χ^2 (8)	df (9)	\overline{dH} , arcmin (10)
J 103938.62+051031.3	0.480	0.984	163	16	0.100	79	10.7	3	16.04
J 155148.09+045930.5	0.275	0.961	74	7	0.087	20	6.9	2	3.47
J 135137.56+043542.0	0.294	0.960	353	30	0.086	104	6.9	2	-18.46
J 142104.21+050845.0	0.280	0.928	169	19	0.110	48	5.3	2	13.69
J 110246.51+045916.7	0.228	0.925	98	9	0.090	22	5.2	2	5.67
J 112437.45+045618.8	0.164	0.895	446	24	0.054	73	6.1	3	2.01
J 101515.53+045305.6	0.168	0.864	112	7	0.060	19	5.6	3	-1.54
J 074239.34+050704.3	0.180	0.855	336	22	0.066	60	5.4	3	-10.75
J 121328.89+050009.9	0.176	0.772	66	6	0.084	12	4.5	3	4.92
J 132448.14+045758.8	0.165	0.762	53	4	0.081	9	4.4	3	3.44
J 104551.72+045552.9	0.083	0.691	150	8	0.055	12	3.7	3	1.43
J 121852.16+051449.4	0.175	0.681	217	27	0.125	38	3.6	3	20.07
J 140730.77+044934.9	0.071	0.674	78	8	0.107	6	2.2	2	-5.37
J 134243.57+050431.5	0.026	0.601	958	58	0.060	25	3.1	3	9.92

$$RMS^F = \frac{1}{n} \sum_i^n RMS_i. \quad (10)$$

RMS_i — относительная среднеквадратичная ошибка определения плотности потока источника в i -ом обзоре, рассчитанная по формуле (5).

На Рис. 7 показаны величины RMS^{sp} (а), RMS^F (б) и RMS^{set} (с) для подвыборки заподозренных в переменности радиоисточников (незаполненные треугольники) и подвыборки “непеременных” объектов (заполненные кружки) в зависимости от RA .

Из приведенных зависимостей видно, что среднеквадратичные ошибки определения плотностей потоков источников из спектральных кривых RMS^{sp} и усредненные по всем обзорам среднеквадратичные ошибки RMS^F практически не отличаются для обеих подвыборок калибровочных источников.

Что касается среднеквадратичных отклонений RMS^{set} , то их величины для первой подвыборки источников, у которых $V > 0$, существенно превышают значения RMS^{set} второй подвыборки ($V < 0$). Для десяти из 14 кандидатов в переменные источники $RMS^{set} > 0.2$. Среднее значение

$\overline{RMS^{set}}$ для первой подвыборки объектов составило 0.23 ± 0.07 , для второй — 0.08 ± 0.04 .

На Рис. 8 и Рис. 9 проводится сравнение величин RMS^{set} с RMS^{sp} и RMS^F . Заполненными кружками показаны зависимости $RMS^{set}(dH)$, незаполненными кружками — зависимости $RMS^{sp}(dH)$ (Рис. 8) и зависимости $RMS^F(dH)$ (Рис. 9). На панелях (а) вышеперечисленные зависимости представлены для “непеременных” объектов, на панелях (б) — для источников, приведенных в Табл. 3.

Для “непеременных” источников относительные среднеквадратичные отклонения RMS^{set} соизмеримы по величине с относительными среднеквадратичными ошибками определения плотностей потоков из спектров RMS^{sp} и существенно меньше усредненных по обзорам среднеквадратичных ошибок определения плотностей потоков RMS^F .

У объектов с положительными значениями индекса долговременной переменности величины RMS^{set} превышают как значения RMS^F , так и RMS^{sp} , причем значения RMS^{sp} в среднем почти в два раза.

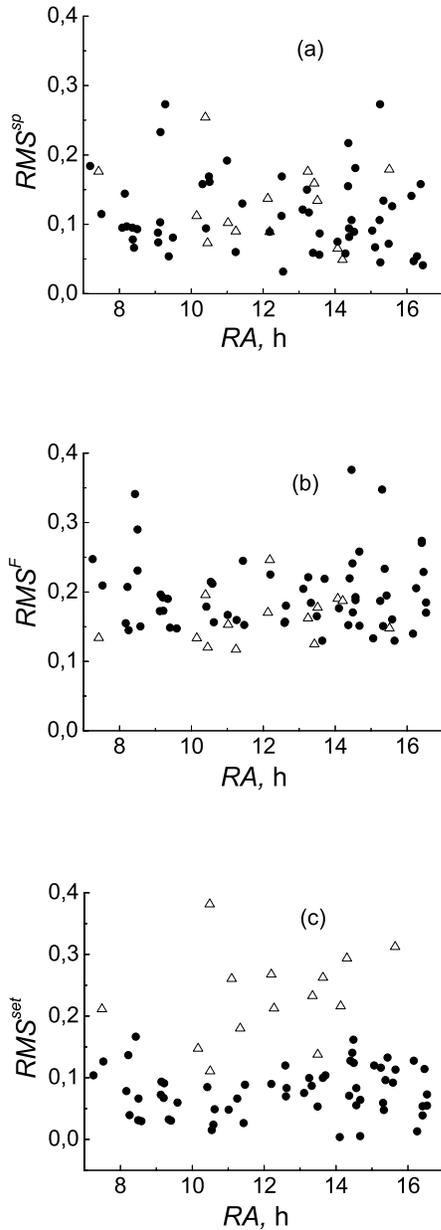


Рис. 7. Зависимости $RMS^{sp}(RA)$ — (a), $RMS^F(RA)$ — (b) и $RMS^{set}(RA)$ — (c) для подвыборки из 14 заподозренных в переменности источников (незаполненные треугольники) и подвыборки “непеременных” объектов (заполненные кружки).

6. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКОВ, ЗАПОДОЗРЕННЫХ В ПЕРЕМЕННОСТИ

Оценим переменность источников, приведенных в Табл. 3, используя статистические подходы, хотя, к сожалению, количество точек для таких оценок невелико.

Для подтверждения факта переменности объ-

ектов с положительным значением V проводились расчеты, аналогичные, выполненным в работах [6, 38–40].

Для n обзоров рассчитывались амплитуда переменности ΔF и параметр V_χ , а также средневзвешенный поток источника $\langle F \rangle$, средневзвешенная среднеквадратичная ошибка $\langle \sigma \rangle$ и критерий χ^2 для числа степеней свободы $df = n - 1$. Расчеты проводились по формулам [38]:

$$\langle F \rangle = \frac{\sum_i^n (F_i / \sigma_i^2)}{\sum_i^n \sigma_i^{-2}}, \quad (11)$$

$$\langle \sigma \rangle = \left(\sum_i^n (1 / \sigma_i^2) \right)^{-0.5}, \quad (12)$$

$$\chi^2 = \sum_i^n (F_i - \langle F \rangle)^2 / \sigma_i^2, \quad (13)$$

$$\Delta F = \left((n - 1) [\chi^2 - (n - 1)] / \sum_i^n (F_i / \sigma_i^2) \right)^{0.5},$$

$$V_\chi = \Delta F / \langle F \rangle. \quad (14)$$

Результаты расчетов этих параметров приведены в Табл. 4. В колонке 2 — параметр V_χ , который характеризует относительную амплитуда переменности, в колонке 3 — вероятность переменности p по критерию χ^2 . Этот параметр дает количественную оценку вероятности того, что источник, чьи плотности потоков распределены как χ^2 с $n - 1$ степенями свободы, может считаться переменным ($p = 1 - \chi^2(n - 1)$). В колонке 4 приводятся значения средневзвешенных потоков источников $\langle F \rangle$, в колонках 5 и 6 — абсолютные $\langle \sigma \rangle$ и относительные $\langle \sigma_{otn} \rangle$ средневзвешенные среднеквадратичные ошибки. $\langle \sigma_{otn} \rangle = \langle \sigma \rangle / \langle F \rangle$. Значения амплитуды переменности источников ΔF даны в колонке 7, в колонках 8 и 9 — критерий χ^2 и количество степеней свободы df , в колонке 10 — средние по всем обзорам значения угла dH (\overline{dH}).

Сравнивая данные, приведенные в Табл. 3 и 4, можно отметить, что значения средневзвешенных плотностей потоков источников $\langle F \rangle$, вычисленные по формуле (11), и средние значения \overline{F} (формула (8)) практически совпадают в пределах ошибок. Относительные среднеквадратичные отклонения от среднего RMS^{set} существенно превышают относительные средневзвешенные среднеквадратичные ошибки $\langle \sigma_{otn} \rangle$. Среднее по всем 14 источникам значение RMS^{set} составляет 0.23 ± 0.07 , усредненное значение $\langle \sigma_{otn} \rangle = 0.08 \pm 0.02$.

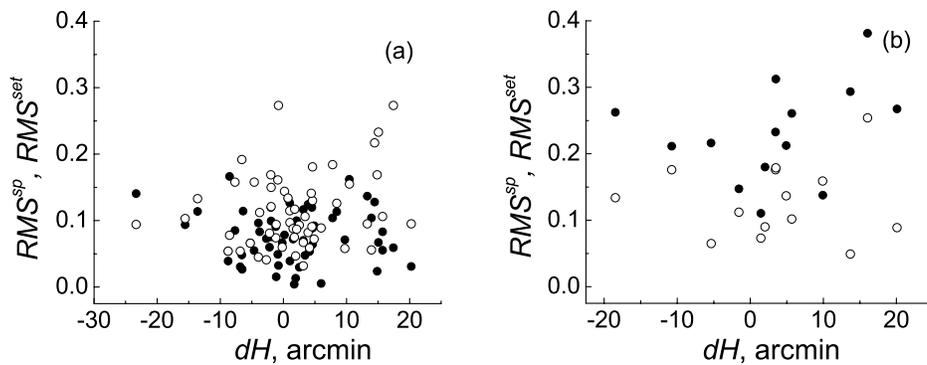


Рис. 8. Зависимости $RMS^{set}(dH)$ (заполненные кружки) и зависимости $RMS^{sp}(dH)$ (незаполненные кружки) для “непеременных” (а) и заподозренных в переменности (б) источников.

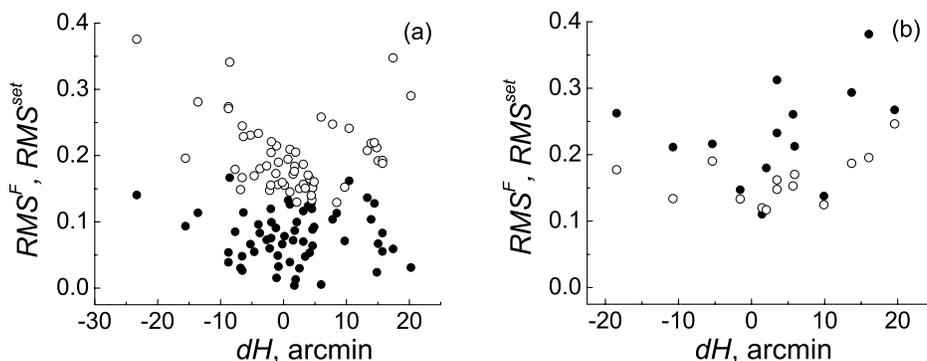


Рис. 9. Зависимости $RMS^{set}(dH)$ (заполненные кружки) и зависимости $RMS^F(dH)$ (незаполненные кружки) для “непеременных” (а) и заподозренных в переменности (б) источников.

На Рис. 6d приведены значения параметра V_X в зависимости от угла dH .

Остановимся на вопросе какие объекты из приведенных в Табл. 3 и 4 можно считать переменными. В работах [39, 40] источник считался возможно переменным, если его вероятность по критерию χ^2 удовлетворяла условию $0.1\% \leq 1 - p \leq 1\%$ и достоверно переменным, если $1 - p \leq 0.1\%$.

Из 14 источников, приведенных в Табл. 3 и 4, нет ни одного, для которого бы выполнялись эти требования. То есть, если использовать критерии из работ [39, 40], то в нашей выборке калибровочных источников нет ни переменных, ни возможно переменных объектов.

В работе [38] переменными считались объекты, у которых $p \geq 0.985$, в работе [6] достоверно переменные — это источники с $p \geq 0.98$, и возможно переменные — с $p \geq 0.95$. Если использовать эти критерии, то возможно перемен-

ными можно считать источники J 155148+045930 и J 135137+043542 ($p = 0.96$) и достоверно переменным — источник J 103938+051031 ($p = 0.984$). Два из них (J 103938+051031 и J 135137+043542) достаточно яркие объекты с плотностями потоков $\bar{F} > 100$ мЯн, которые проходят на расстоянии порядка полутора—двух полуширин вертикальной ДН от центрального сечения обзора по склонению, источник J 155148+045930 — слабее ($\bar{F} = 79$ мЯн), но проходит близко от центрального сечения обзора ($\overline{dH} = 3.5'$).

В работе [37] в качестве критерия использовался коэффициент V_F . Задавалось его пороговое значение $V_F = 3$, при достижении которого, источник считался переменным. Иначе, переменными считались те объекты, у которых разность плотностей потоков ΔF в обзорах превышает 3σ , где $\sigma = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}$ (формула (2)). Из 14 заподо-

зренных в переменности объектов нашей выборки этому требованию удовлетворяет лишь источник J 103938+051031. Еще семь источников удовлетворяют требованию $\Delta F > 2\sigma$.

Рассмотрим в качестве критерия переменности параметр V_χ . Анализ приведенных в работе [38] данных показал, что значения параметра V_χ переменных источников (с $p \geq 0.985$) в основном превышает 0.2. Однако есть несколько объектов, у которых $V_\chi = 0.15-0.17$. Кроме того, у некоторых “непеременных” источников с p существенно меньшим 0.985 параметр V_χ также оказался больше 0.2. В нашей выборке из 14 источников 11 имеют значения $V_\chi \geq 0.164$, и только у трех $V_\chi < 0.1$.

Резюмируя полученные результаты, можно сказать, что все приведенные в Табл. 3 и 4 источники можно считать возможно переменными, поскольку их плотности потоков, определенные по данным разных циклов, превышают суммарные ошибки определения потоков. Однако достоверность этой переменности у источников различна. Лишь один из них можно считать достоверно переменным и два возможно переменными по критериям работ [6, 37, 38]⁸.

Четыре объекта, J 104551+045552, J 121852+051449, J 134243+050431, J 140730+044934, которые имеют самые низкие положительные величины индекса долговременной переменности V ($V = 0.007-0.035$) и вероятности по критерию χ^2 ($0.6 < p < 0.7$), являются наименее вероятными кандидатами в переменные источники. Три последних к тому же меняют знак индекса переменности V на отрицательный, если учесть небольшую систематику в поведении зависимости $G = (F_i/T_{ai})/(A/k_{DN})$ от dH в обзорах 1993 и 1994 гг.

Остальные семь источников (J 074239+050704, J 101515+045305, J 110246+045916, J 112437+045618, J 121328+050009, J 132448+045758, J 142104+050845) занимают промежуточное положение. Хотя индекс долговременной переменности у них и положителен, но вероятностью по критерию χ^2 — мала.

Таким образом, из порядка 80 выбранных каталоговых источников только три можно считать переменными с вероятностью $p > 0.95$ и еще семь — возможно переменными.

Отметим, что восемь из 14 приведенных в Табл. 3 объектов (J 074239+050704, J 103938+051031, J 110246+045916, J 121328+050009, J 132448+045758, J 135137+043542, J 142104+

050845, J 155148+045930) имеют индекс переменности $V \gtrsim 0.08$, что сравнимо с индексами долговременной переменности, полученными в работе [41] для переменных источников с плоскими спектрами.

Приведем более подробные характеристики всех 14 кандидатов, поскольку для всех имеются оптические отождествления.

J 074239+050704 (или 4C+05.33) — отождествлен с галактикой, причем показатели цвета этого объекта по данным обзора среднего инфракрасного диапазона WISE [42] присущи спиральной галактике. Это подтверждается в базе данных NED, где галактика классифицирована как сейфертовская Sy2 с $Z = 0.16$. По данным каталогов GSC [43] и USNO-B1 [44] объект имеет в близких фильтрах разброс в 1^m2 , что может быть признаком переменности в оптическом диапазоне. Исследовался в работе [6].

J 101515+045305 (или PMN J 1015+0452) — точечный источник, по картам FIRST отождествлен с галактикой, которую по показателю цвета $(u-r) > 2.22$ [45], можно отнести к галактикам ранних типов.

J 103939+051031 (или PKS J 1037+05) — двойной источник (FIRST) с так называемой “winged” морфологией, которая может свидетельствовать о взаимодействии обратного потока плазмы от долей радиоисточника с неоднородным окружением. Другая модель объясняет такую морфологию “стареющими” компонентами, оставшимися от быстрой переориентации черной дыры и аккреционного диска из-за мерджинга и последовавшего возобновления активности ядра [46, 47]. Отождествлен с переменной в оптике эллиптической галактикой ($Z = 0.068$) из скопления Abell 1066, близко расположенной рядом с двумя другими галактиками. По полученным критериям переменности — наиболее вероятный кандидат в переменные объекты.

J 110246+045916 — имеет такую же морфологию, как и J 103939+051031, отождествляется с возможно переменным в оптике звездным объектом, предположительно квазаром.

J 112437+045618 (4C+05.50) — двойной источник из выборки объектов с крутыми спектрами каталога RC, оптическое отождествление и спектр которого были получены на 6-м телескопе БТА по программе поиска далеких галактик “Большое Трио” [48]. В работе [49] оптический объект классифицирован как галактика ($Z = 0.284$), в спектре которой есть узкие эмиссионные линии и линии поглощения. В обзоре SDSS [50] объект определен как сейфертовская галактика (Sy2) с $Z = 0.283$. Возможно, переменный в оптике.

J 121328+050009 (PMN J 1213+0500) — двойной источник с ядром, как и J 112437+045618,

⁸По более строгим статистическим критериям, используемым в работах [39, 40], и эти источники нельзя назвать переменными.

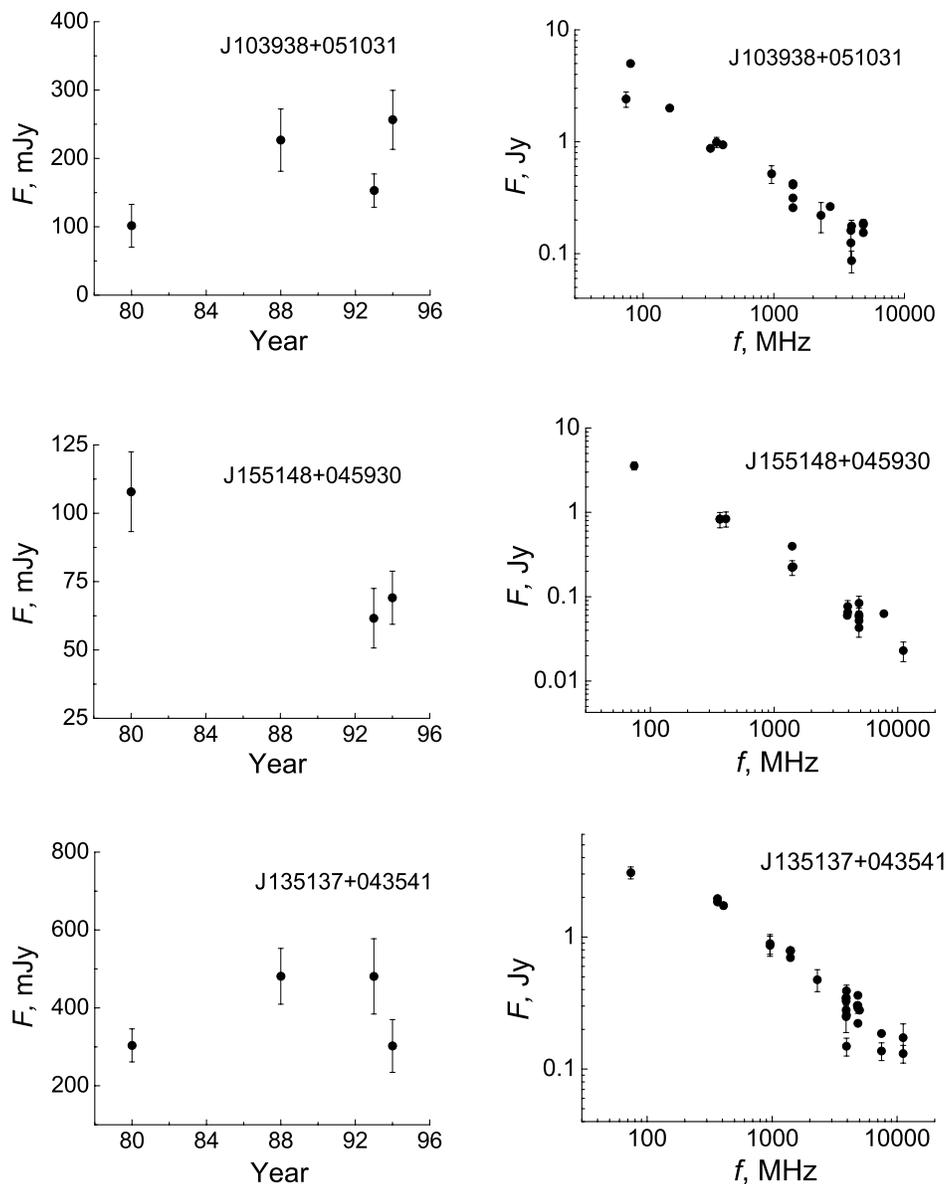


Рис. 10. Кривые блеска (слева) и спектры (справа) калибровочных источников, заподозренных в переменности ($V > 0$), для которых вероятность по критерию $\chi^2 p > 0.95$.

входит в SS-выборку каталога RC, отождествлен с галактикой ($Z_{ph}=0.76$).

J 132448+045758 — двойной источник, отождествленный со звездным объектом, вероятно, квазаром.

J 135137+043542 (MRC J 1349+048) — точечный источник, исследовался в работе [6], отождествляется в SDSS со слабой галактикой. Считаем его переменным радиоисточником.

J 142104+050845 — точечный источник, отождествляется с галактикой ($Z = 0.455$), которая может быть входит в тройную группу, возможно переменный в оптике объект.

J 155148+045930 (PMN J 1551+0458) — двойной источник; так же, как J 112437+045618 и J 121328+050009, из SS-выборки каталога RC; отождествлен со слабой галактикой 23^m6 в фильтре R. Считаем его переменным радиоисточником.

Следующие четыре источника были отобраны в качестве кандидатов, но не удовлетворили выбранным критериям переменности и, по имеющимся данным, мы не можем отнести их к переменным.

J 104551+045553 (PMN J 1045+0455) — вероятно двойной источник, отождествляется с галактикой в обзоре SDSS.

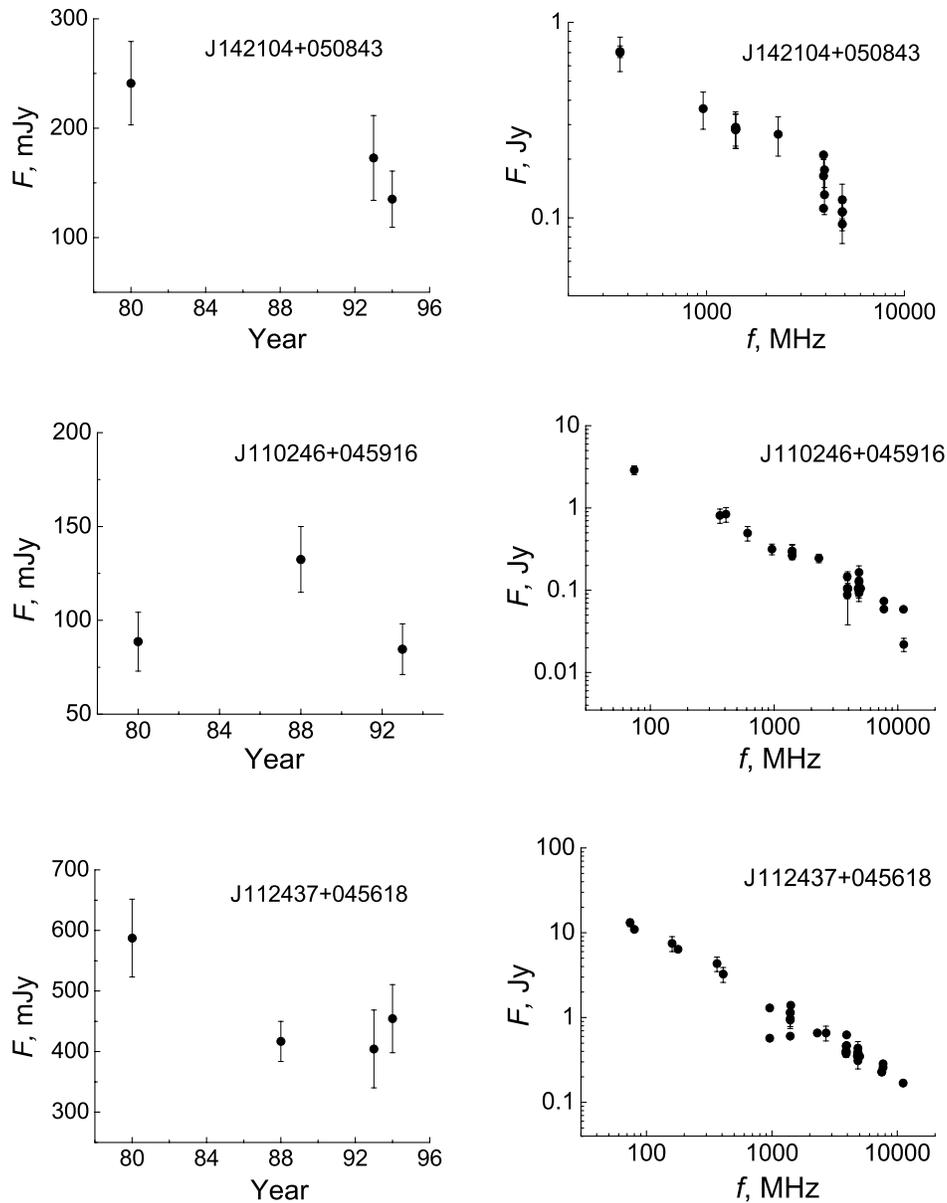


Рис. 11. То же, что и на Рис. 10, для источников с $0.89 < p < 0.95$.

J 121852+051449 — двойной источник, отождествляется с эллиптической галактикой ($Z = 0.078$), переменной в оптике, которая является ярчайшей в скоплении Abell 1516.

J 134243+050431 (4C+05.57) — двойной источник FRI-типа, отождествляется с переменной в оптике сейфертовской галактикой (Sy1), $Z = 0.136$.

J 140730+044934 — двойной источник, отождествляется с кандидатом в квазары с $Z_{ph} = 1.775$, возможно переменным в оптике.

В оптическом диапазоне переменность показывают девять из 14 источников, приведенных в Табл. 3: J 074239+050704, J 103938+051031,

J 110246+045916, J 112437+045618, J 121328+050009, J 121852+051449, J 134243+050431, J 140730+044934, J 142104+050845. Для остальных источников мало данных, чтобы делать какие-либо выводы.

На Рис. 10–13 приведены кривые блеска (слева) и спектры (справа) калибровочных источников из Табл. 3 и 4: на Рис. 10 для объектов с $p > 0.95$, на Рис. 11 — с $0.89 < p < 0.95$, на Рис. 12 — с $0.75 < p < 0.89$ и на Рис. 13 — с $0.6 < p < 0.7$.

На Рис. 14 и 15 для сравнения показаны кривые блеска (слева) и спектры (справа) “непеременных”

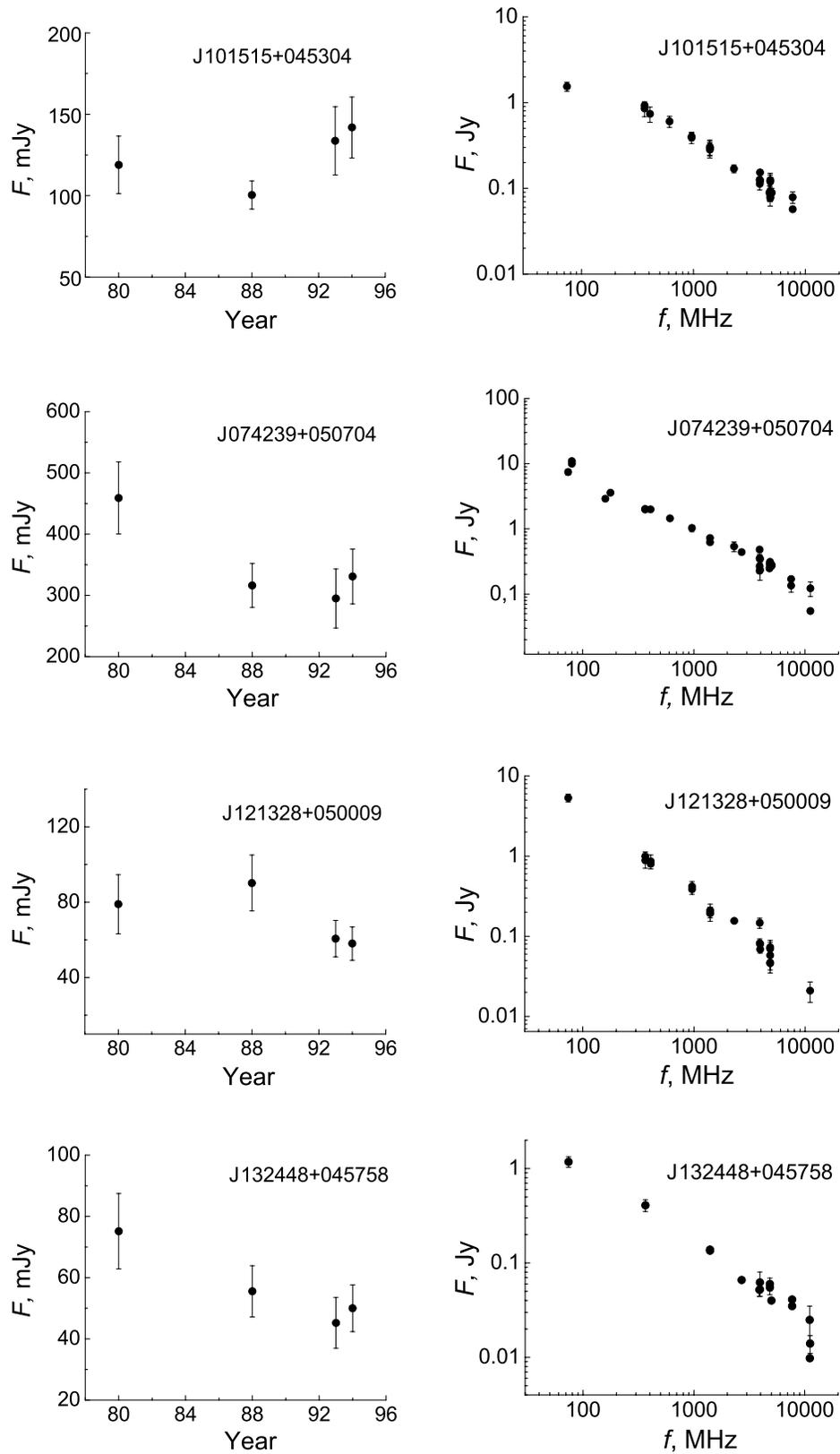


Рис. 12. То же, что и на Рис. 10, для источников с $0.75 < p < 0.89$.

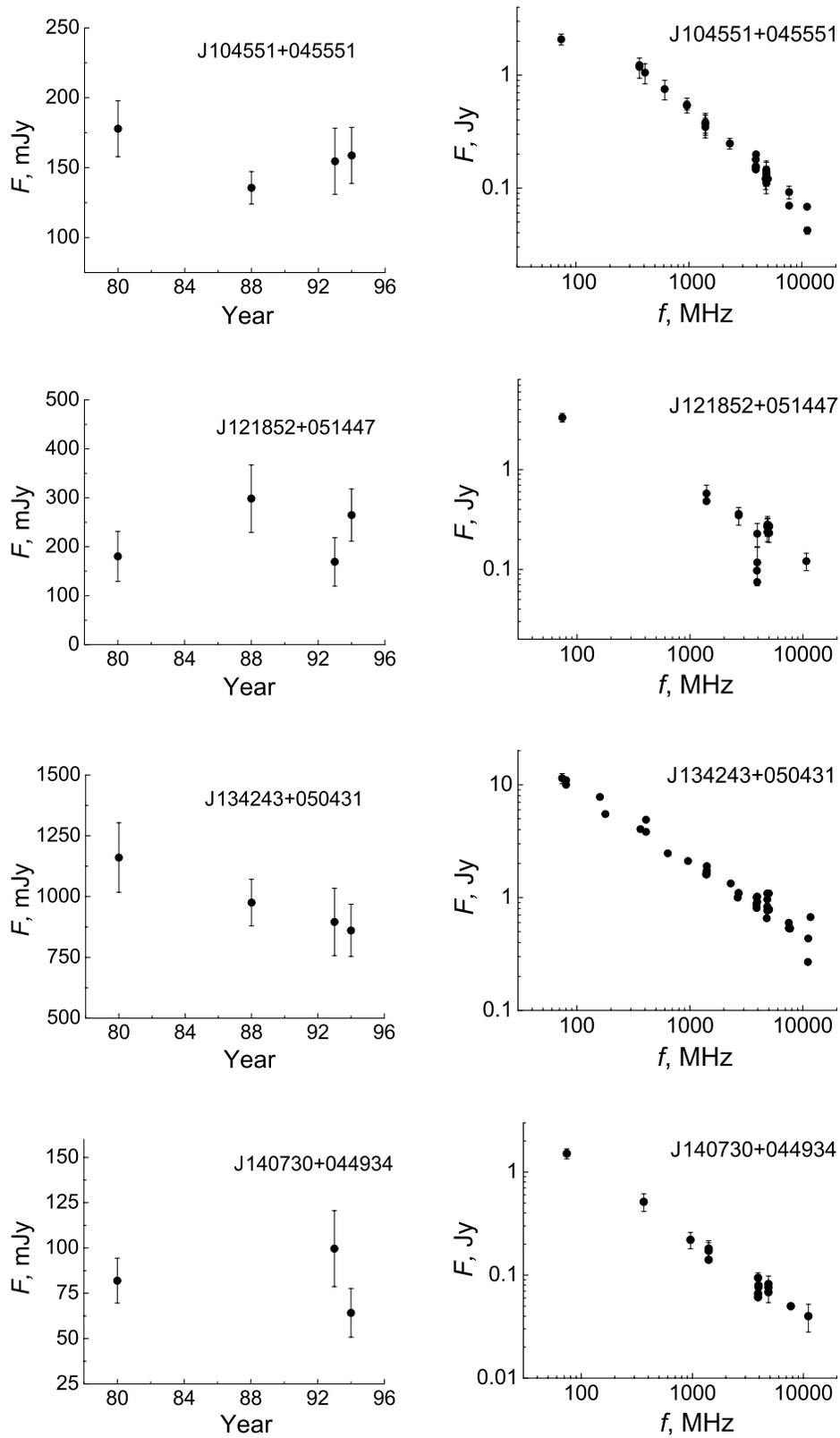


Рис. 13. То же, что и на Рис. 10, для источников с $0.6 < p < 0.7$.

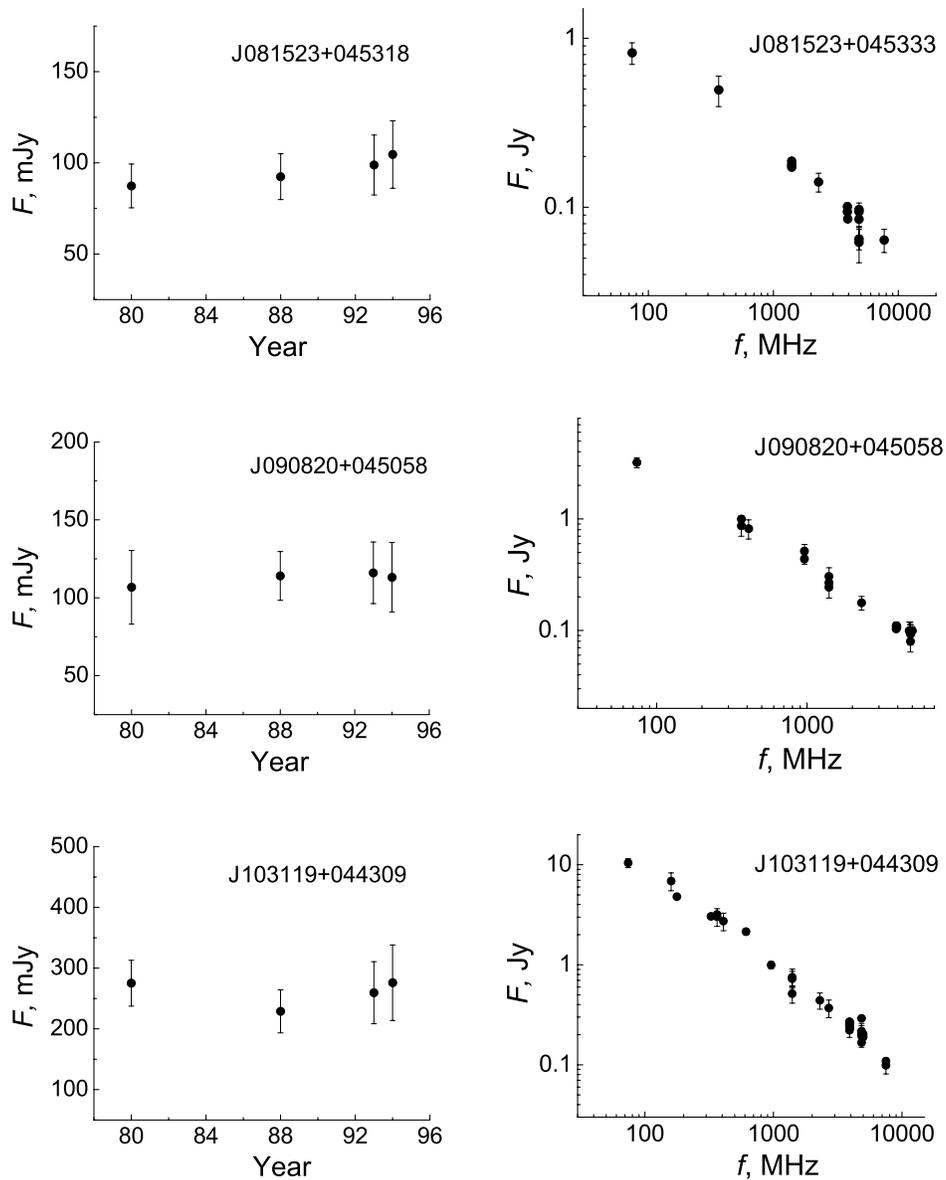


Рис. 14. То же, что и на Рис. 10, для “непеременных” объектов, у которых индекс долговременной переменности $V < 0$.

источников, у которых индекс долговременной переменности $V < 0$.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обнаружения переменных источников по данным глубоких обзоров, проводившихся на РАТАН-600 в 1980–1994 гг., был проведен более тщательный отбор калибровочных источников, построены экспериментальные зависимости F/T_a и расчетные калибровочные кривые, сделан подробный анализ и оценка относительных среднеквадратичных ошибок для каждого из обзоров.

Для проверки калибровочных источников на переменность проведены количественные оценки

параметров, характеризующих переменность объектов, основным из которых был индекс долговременной переменности V , а также исследование статистических характеристик объектов, заподозренных в переменности.

Из всей рассмотренной выборки калибровочных источников (порядка 80 объектов) у 14 индекс долговременной переменности оказался положительной величиной хотя бы для одной пары обзоров. У восьми из них значения $V > 0.08$, у десяти максимальная величина плотности потока превысила минимальную более, чем в полтора раза.

У этих 14 источников были оценены вероятность переменности p по критерию χ^2 и параметр

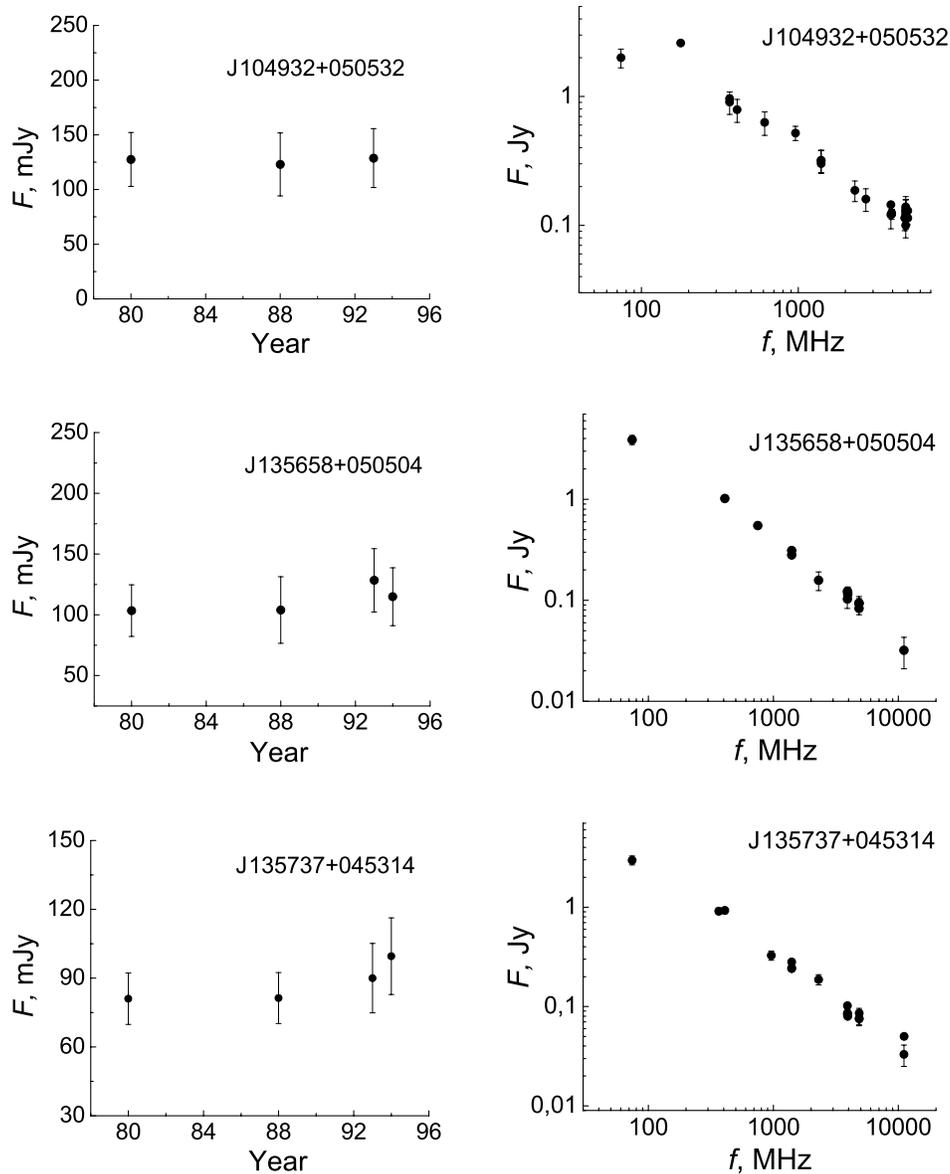


Рис. 15. То же, что и на Рис. 14.

V_{χ} , характеризующий относительную амплитуду переменности.

Наиболее вероятными кандидатами в переменные оказались три источника: J 155148+045930 ($p = 0.961$), J 135137+043542 ($p = 0.960$) и J 103938+051031 ($p = 0.984$).

Источник J 103938+051031 удовлетворяет условию переменности и по критерию $V_F > 3\sigma$, где $\sigma = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}$ (σ_i, σ_j — среднеквадратичные ошибки определения потоков объекта в i -ом и j -ом обзоре). У семи источников $2\sigma < V_F < 3\sigma$, а вероятность переменности по критерию $\chi^2 p > 0.85$.

У остальных шести объектов этой выборки $0.6 < p < 0.8$.

Следует, однако, отметить, что два из трех наиболее вероятных кандидатов в переменные, J 103938+051031 и J 135137+043542, в одном из обзоров проходят довольно далеко от его центрального сечения ($|dH| > 18'$). Хотя они хорошо выделяются на записях, определение их плотностей потоков связано с большими сложностями, чем у источников, близких к центральному сечению, прежде всего потому, что они представляют собой протяженные структуры.

Если применять более строгие критерии, используемые в работах [39, 40], а именно, считать

возможно переменным источник с $p > 0.99$ и достоверно переменным, если $p > 0.999$, то в нашей выборке переменных источников нет.

У девяти источников из 14 по данным каталогов GSC, USNO-B1 и обзоров 2MASS, SDSS, LAS UKIDSS наблюдается разброс звездных величин в близких фильтрах примерно от $0^m.8$ до 3^m , что указывает на переменность еще и в оптическом диапазоне.

Оценки относительных среднеквадратичных отклонений плотностей потоков RMS^{set} от их среднего по всем обзорам значения, проведенные для подвыборок объектов с $V > 0$ и $V < 0$, показал их значимое отличие. Усредненные по всей подвыборке значения RMS^{set} источников, заподозренных в переменности, составили 0.23 ± 0.07 , а для подвыборки “непеременных” объектов $RMS^{set} = 0.08 \pm 0.04$. Это позволяет утверждать, что плотности потоков подавляющего большинства калибровочных источников слабо менялись от обзора к обзору, а ошибки определения плотностей потоков в среднем не превышали 10%.

Полученные в настоящей работе калибровочные кривые, а также оценки относительных среднеквадратичных ошибок определения плотностей потоков, позволят продолжить поиск переменных источников по более многочисленной выборке объектов, наблюдавшихся в данных обзорах, что и будет сделано в следующих работах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Этой работой мы отдаем дань памяти и выражаем признательность и уважение Наталье Сергеевне Соболевой, ее многолетней и основополагающей работе по глубоким поисковым обзорам на радиотелескопе РАТАН-600. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 11-02-12036, 11-02-00489 и 10-07-00412) и Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 16.552.11.7028, 16.518.11.7062). В исследованиях использовались средства доступа к каталогам VizieR и база данных SIMBAD (CDS, Страсбург, Франция), а также база данных внегалактических объектов NED (NASA/IPAC Extragalactic Database), поддерживаемая лабораторией JPL Калифорнийского технологического университета по контракту с NASA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю. Н. Парийский и Д. В. Корольков, Итоги Науки и Техники. Серия Астрономия **31**, 73 (1986).
2. В. Р. Амirkhanyan, А. Г. Gorshkov, А. А. Капустин и др., Сообщения CAO **47**, 5 (1985).
3. *Каталог радиоисточников Зеленчукского обзора неба в диапазоне склонений $0^\circ - 14^\circ$* , ред. М. Г. Ларионов, (Изд-во Московского университета, 1989).
4. V. R. Amirkhanyan, A. G. Gorshkov, and V. K. Konnikova, *Sov. Astron. Lett.* **15**, 378 (1989).
5. V. R. Amirkhanyan, A. G. Gorshkov, and V. K. Konnikova, *Sov. Astron.* **36**, 115 (1992).
6. A. G. Gorshkov and V. K. Konnikova, *Astron. Rep.* **39**, 257 (1995).
7. Ю. А. Ковалев, Сообщения CAO **68**, 60 (1991).
8. Yu. A. Kovalev, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **44**, 50 (1997).
9. A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, and M. G. Mingaliev, *Astron. Rep.* **44**, 161 (2000).
10. A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, and M. G. Mingaliev, *Astron. Rep.* **47**, 903 (2003).
11. A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, and M. G. Mingaliev, *Astron. Rep.* **52**, 278 (2008).
12. Yu. V. Sotnikova, M. G. Larionov, and M. G. Mingaliev, *Astrophysical Bulletin* **64**, 185 (2009).
13. A. G. Gorshkov, V. K. Konnikova, and M. G. Mingaliev, *Astron. Rep.* **54**, 908 (2010).
14. Yu. N. Parijskij and D. V. Korolkov, *Sov. Sci. Rev. Astrophys. Space Phys.* **5**, 39 (1986).
15. N. N. Bursov, Yu. N. Pariiskii, E. K. Maiorova, et al., *Astron. Rep.* **51**, 197, (2007).
16. Н. Н. Бурсов, Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук (CAO РАН, Нижний Архыз, 2003).
17. Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, N. M. Lipovka, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **87**, 1 (1991).
18. Yu. N. Parijskij, N. N. Bursov, N. M. Lipovka, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **96**, 583 (1992).
19. N. N. Bursov, *Astron. Rep.* **41**, 35 (1997).
20. N. S. Soboleva, N. N. Bursov, A. V. Temirova, *Astron. Rep.* **50**, 341 (2006).
21. N. S. Soboleva, E. K. Majorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astrophysical Bulletin* **65**, 42 (2010).
22. S. P. Spangler and D. B. Cook, *Astronom. J.* **85**, 659 (1980).
23. M. F. Aller, H. D. Aller, and P. H. Hughes, *Astronom. J.* **586**, 33 (2003).
24. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., *Astronom. J.* **115**, 1693 (1998).
25. NED, <http://nedwww.ipac.caltech.edu/>.
26. A. S. Cohen, W. M. Lane, W. D. Cotton, N. E. Kassim, et al., *Astronom. J.* **134**, 1245 (2007).
27. P. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas, and J. J. Condon, *Astrophys. J. Suppl.* **103**, 427 (1996).
28. Н. А. Есепкина, Н. Л. Кайдановсий, Б. В. Кузнецов и др., *Радиотехника и электроника* **6**, 1947 (1961).
29. Н. А. Есепкина, Н. С. Бахвалов, Б. А. Васильев и др. *Астрофиз. исслед. (Изв. CAO)* **11**, 182 (1979).
30. Н. А. Есепкина, Б. А. Васильев, И. А. Водоватов и М. Г. Высоцкий, *Астрофиз. исслед. (Изв. CAO)* **11**, 197 (1979).
31. E. K. Majorova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **53**, 78 (2002).

32. E. K. Majorova and S. A. Trushkin, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **54**, 89 (2002).
33. О. В. Верходанов, Б. Л. Ерухимов, М. Л. Моносов и др., *Препринт САО*, **78**, 1 (1992).
34. E. K. Majorova and N. N. Bursov, *Astrophysical Bulletin* **62**, 378 (2007).
35. E. K. Majorova, *Astrophysical Bulletin* **65**, 196 (2010).
36. W. H. de Vries, R. H. Becker, R. L. White, and D. J. Helfand, *Astronom. J.* **127**, 2565 (2004).
37. Ting-Gui Wang, Hong-Yan Zhou, Jung-Xian Wang, et al., *Astrophys. J.* **645**, 856 (2006).
38. G. A. Seielstad, T. J. Pearson, and A. C. S. Readhead, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **95**, 842 (1983).
39. M. J. L. Kesteven, A. H. Bridle, and G. W. Brandie, *Astronom. J.* **81**, 919 (1976).
40. R. Fanti, A. Ficarra, F. Mantovani, and L. Padrielli, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **36**, 359 (1979).
41. V. L. Afanas'ev, S. N. Dodonov, A. V. Moiseev, et al., *Astron. Rep.* **53**, 287 (2009).
42. E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, et al., *Astronom. J.* **140**, 1868 (2010).
43. B. M. Lasker, M. G. Lattanzi, B. J. McLean, et al., *Astronom. J.* **136**, 735 (2008).
44. D. G. Monet, S. E. Levine, B. Canzian, et al., *Astronom. J.* **125**, 984 (2003).
45. I. Strateva, Z. Ivezić, G. R. Knapp, et al., *Astronom. J.* **122**, 1861 (2001).
46. C. C. Cheung, *Astronom. J.* **133**, 2097 (2007).
47. D. Cseh, S. Frey, Z. Paragi, et al., *Astronom. and Astrophys.* **523**, 34 (2010).
48. Yu. N. Parijskij, N. S. Soboleva, W. M. Goss, et al., *IAUS* **175**, 591 (1996).
49. Yu. N. Parijskij, A. I. Kopylov, A. V. Temirova, et al., *Astron. Rep.* **54**, 675 (2010).
50. K. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 543 (2009).

On Possibility of Detection of Variable Sources Using the Data of “Cold” Surveys Carried Out on RATAN-600

E.K. Majorova, O.P. Zhelenkova

In this study we attempt to assess the possibility of detection of variable sources using the data of the 7.6-cm wavelength surveys carried out on the RATAN-600 radio telescope in the period from 1980 through 1994. Objects selected according to certain criteria from the RCR catalog are used to construct the calibration curves and to estimate the accuracy of the resulting calibration curves and determine the r.m.s. errors for the measured source flux densities. To check the calibration sources for the presence of variable objects, quantitative estimates are performed for a number of parameters that characterize variability, in particular, for the long-term variability index V and the χ^2 (chi-square) probability p . The long-term variability index was found to be positive for 14 out of approximately 80 calibration sources, possibly indicating that these sources are variable. The most likely candidate variables are the three sources with the χ^2 probability $p > 0.95$. Five sources have χ^2 probabilities in the $0.85 < p < 0.95$ interval, and the remaining six in the $0.6 < p < 0.8$ interval. Nine out of 14 objects are possibly variable in the optical range. The light curves and spectra are determined for possible variable sources and a number of “non-variable” objects. We plan to use the results of this study in our future searches for variable radio sources using the data of the “Cold” surveys.

Keywords: *methods: data analysis—surveys—radio continuum: galaxies—galaxies: active*