

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СЕЧЕНИЙ ПО СКЛОНЕНИЮ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИОИСТОЧНИКОВ В РЕЖИМЕ НЕПОДВИЖНОГО ФОКУСА НА РАТАН-600

*Н. Н. Бурсов, О. В. Верходанов, Б. Л. Ерухимов,
Н. М. Липовка, Т. Б. Пятунина, Н. С. Соболева,
А. В. Темирова, В. Н. Черненко*

Методом сечений в режиме неподвижного фокуса по наблюдениям на РАТАН-600 в полосе обзора «Холод» в интервале $4^{\circ}35' \leq \delta_{19,50.0} \leq 5^{\circ}52'$, $1^{\text{h}}40^{\text{m}} \leq \alpha_{1950.0} \leq 9^{\text{h}}15^{\text{m}}$ определены склонения для 26 достаточно сильных объектов каталога Дугласа (365 МГц), а также соседних с ними более слабых источников. Использование метода сечений в режиме неподвижного фокуса позволило существенно улучшить точность определения склонений: для источников с $T_A \geq 100$ мК на волне $\lambda = 7.6$ см она составляет $2''$. Поле ошибок для исследованных объектов оказалось 6 кв. сек. дуги. Такая точность позволяет проводить оптические отождествления радиоисточников с предельно слабыми объектами, видимыми на 6-м телескопе САО. По наблюдениям на РАТАН-600 на трех волнах одновременно с использованием опубликованных данных построены спектры исследованных объектов. Оказалось, что 20 объектов (из 37) со степенными спектрами имеют средний спектральный индекс 0.89 ± 0.03 .

The declinations of 26 strong sources of the Texas survey at 365 MHz located in the region $4^{\circ}35' \leq \delta_{1950.0} \leq 5^{\circ}52'$, $1^{\text{h}}40^{\text{m}} \leq \alpha_{1950.0} \leq 9^{\text{h}}15^{\text{m}}$ and of several weak sources detected in their vicinity were determined in the 7.6 cm RATAN-600 observations by the so called method of «declination cross-sections» under the unmovable secondary mirror. The complicated shape of the two-dimensional antenna patterns of the RATAN-600 was used in this method. For the sources with $T_a \geq 100$ mK at 7.6 cm this method permitted to improve declination accuracy up to $2''$. The error box for the objects was 6 square sec. of arc. This is sufficient for optical identifications with the 6-meter telescope. The three frequencies RATAN-600 radio spectra of the investigated objects were obtained (the previously published data were used also). 20 out of the overall number 37 objects were found to have steep spectra with the median spectral index 0.89 ± 0.03 .

РАТАН-600 может поставлять огромное количество информации. Важность определения точных координат была и раньше достаточно очевидна, однако только после того как появились оценки поверхностной плотности предельно слабых оптических объектов вплоть до 26—27 звездной величины [1], удалось уточнить требования к погрешностям определения координат радиоисточников. Без отождествления с оптическими объектами обычно нет уверенности в правильном понимании природы объекта, обнаруженного в любом диапазоне волн. Это связано с тем, что оптика дает основной поток информации о расстоянии до объекта, а классификация небесных тел по характеру оптического спектра настолько разработана, что почти без ошибок можно назвать класс объекта, с которым связано радиоизлучение.

Как следует из [1], для отождествления радиоисточников с объектами Паломарского атласа неба необходима точность не хуже $0.3''$, с объектами, видимыми на 6-м телескопе, — не хуже $3''$ — $5''$, а с объектами, видимыми на космических телескопах ближайших лет, — выше $1''$ по обеим координатам.

В настоящей работе поставлена ограниченная задача — найти способ массового определения α , δ с точностью в несколько секунд дуги для радиоисточников, для которых отношение сигнал/шум позволяет это сделать.

Как показал эксперимент «Холод» [2, 3], в области плотностей потоков 10—100 мЯн и выше необходимое отношение сигнал/шум может быть достигнуто в глубоких обзорах РАТАН-600. Этот интервал плотностей потоков попадает в наиболее информативный для исследования Большой Вселенной участок на

кривой $\log N - \log S$, где как более сильные, так и значительно более слабые радиоисточники в среднем оказываются более близкими. Таким образом, с существующими средствами наблюдений, пока не достигнута чувствительность в доли микроярских, при которой спиральные и сейфертовские галактики могут быть зарегистрированы на расстояниях $2 < z < 5$, т. е. в области резкого падения пространственной плотности основной массы радиоисточников, эпоху формирования галактик следует изучать, привлекая радиоисточники с $10 \text{ мЯн} < S < 100 \text{ мЯн}$.

Радиогалактики высокой светимости должны составлять большую долю от всех объектов в интервале $10 \text{ мЯн} < S < 100 \text{ мЯн}$. С другой стороны, так как светимость в оптическом диапазоне выше, чем в радиодиапазоне, то можно установить нижнюю границу глубины снимков оптических полей, необходимых для гарантированного оптического отождествления. Оказывается, что этот порог составляет 25—26 зв. величин, что потенциально достижимо с лучшим современным оборудованием на 6-м телескопе. Таким образом, объекты, доступные РАТАН-600, могут быть отождествлены и имеют особое значение для исследования эпохи формирования радиоизлучающих галактик.

Одной из важнейших задач собственно радиоастрономии является исследование причин возникновения и эволюции феномена радиогалактик. Радиогалактики могут как опережать, так и отставать от эволюции оптических объектов в зависимости от того, что является первичным — черные дыры в ядрах или протяженные газовые или звездные структуры.

Если источник точечный, то он всегда совпадает с ядром галактики или квазара. Если он протяженный, то положение усложняется, и центр тяжести радиоизлучения может не совпадать с положением оптического объекта. Здесь мы хотим отметить, что высокоточные координатные измерения полезны и для физической интерпретации радиоисточников со сложной структурой. Сравнение координат центра тяжести двойных радиоисточников с плоскими спектрами в см-диапазоне волн, с координатами центра тяжести их в м-диапазоне позволяет определить положение активного ядра галактики относительно центра тяжести двойной радиогалактики. Это, в свою очередь, позволяет уточнить модель двойных радиогалактик. Для двойных радиогалактик с нормальным спектром частотное смещение координат используется для количественной оценки различия спектральных индексов компонент радиогалактик.

Наконец, для источников со спектром класса С — увеличение крутизны спектра к высоким частотам, сведения об относительной интенсивности компонент, а следовательно, и частотной зависимости координат центра тяжести позволяют оценить скорости разлета компонент и не в релятивистском случае [4].

Улучшение метода опорного объекта при наблюдениях с неподвижным фокусом позволяет улучшить и шкалу плотностей потоков в каталогах РАТАН-600 и, следовательно, получить более качественные спектры радиоисточников. Как показано в работе [5], различные космологические модели приводят к различной зависимости среднего спектрального индекса источников от плотности потока в областях плотностей потоков от 200 мЯн и меньше на частоте 480 МГц. Массовые исследования спектрального индекса по каталогам РАТАН-600 могут привести к уточнению космологической модели.

Описание эксперимента и обработки данных наблюдений. Основная цель настоящей работы состояла в том, чтобы оценить потенциальную координатную точность по склонению, а также предельную точность определения плотностей потоков в режиме неподвижного фокуса [6, 7]. Обработка наблюдений цикла «Холод» показала, что при неподвижном вторичном облучателе стабильность моментов кульминации, определенная по ярким источникам, составляет 0.05 с или 0.75 [8]. Для определения склонений в настоящем цикле использовались наблюдения источников на нескольких сечениях с разными $\Delta h = h_{\text{двигр}} - h_{\text{вст}}$. Этот метод использовался и ранее. Как показано в работе [9], точность определения склонений на Северном секторе РАТАН-600 при подвижном вторичном облучателе методом сечений для сильных источников составляла $6'' - 12''$. В работе [10] таким методом на волне 1.38 см были определены с высокой точностью положения «горячих» пятен в компонентах радиоисточника Лебедь А.

ТАБЛИ
Параметры

Имя источника	Координаты каталога Дугласа $\nu = 365$ МГц		$\alpha_{4.XII.86}$	$\delta_{4.XII.86}$	$\Delta\alpha = \alpha_{набл} - \alpha_{рас}$
	$\alpha_{1950.0}$	$\delta_{1950.0}$			
1	2	3	4	5	6
	h m s	° ' "	h m s	° ' "	
0146+056	1 46 45.427	5 40 59.85	1 48 41.7	5 51 58.4	
0147+054	1 47 59.149	5 29 14.08	1 49 58.6	5 40 35.4	
0210+050	2 10 59.404	5 04 20.75	2 12 56.0	5 14 47.8	
0230+045	2 30 53.947	4 35 45.97	2 32 50.7	4 45 36.2	36 ^s 3
0303+052	3 03 29.905	5 12 49.95	3 05 27.5	5 21 30.8	-16.0
0320+053	3 20 41.520	5 23 33.71	3 22 39.5	5 31 33.4	
0338+045	3 38 31.186	4 57 32.62	3 40 32.4	5 04 58.2	
0340+048	3 40 51.354	4 48 21.14	3 42 49.2	4 55 29.3	
0348+045	3 48 15.335	4 57 19.85	3 50 13.4	5 04 08.2	
0423+047	4 23 40.103	4 43 41.48	4 25 38.3	4 48 49.8	
0425+048	4 25 8.525	4 50 30.58	4 27 6.9	4 55 34.6	
0502+049	5 2 43.845	4 55 38.36	5 04 42.5	4 58 48.1	
0531+050	5 31 55.586	5 1 43.86	5 33 54.4	5 3 21.2	
0532+052	5 32 26.353	5 14 11.82	5 34 28.6	5 15 49.6	
0544+051	5 44 46.192	5 11 37.30	5 46 45.1	5 12 33.4	
{ 0616+051	6 16 20.527	5 7 47.86	6 18 19.3	5 7 2.2	
{ 0619+051*					m s
{ 0620+051*					3 06.5
					4 12.7
0621+049	6 21 39.358	4 58 41.49	6 23 38.0	4 57 38.7	
0659+047	6 59 29.999	4 44 33.67	7 1 28.2	4 41 34.8	
0716+048	7 16 21.792	4 52 38.75	7 18 20.0	4 48 43.7	
0721+048	7 21 36.990	4 51 15.51	7 23 35.1	4 47 4.5	
0746+047	7 46 32.455	4 46 9.23	7 48 30.2	4 40 44.3	
0750+048	7 50 26.760	4 52 32.45	7 52 24.6	4 46 56.3	7.2
0812+050	8 12 44.663	5 2 45.52	8 14 42.3	4 56 7.0	
0818+050	8 18 18.113	5 3 50.20	8 20 15.7	4 56 56.8	
{ 0842+048 I*	8 42 52.844	4 53 37.29	8 44 49.9	4 45 40.9	-13.3
{ 0842+048 II					
0904+048	9 04 42.475	4 48 25.78	9 6 39.1	4 39 38.0	
0907+045	9 07 13.561	4 56 36.02	9 9 13.4	4 47 27.8	
0911+048	9 11 9.937	4 48 58.34	9 13 6.4	4 39 56.2	
1548+056	15 48 6.909	5 36 10.49	15 49 54.7	5 29 26.5	
1549+056	15 49 24.418	5 40 58.56	15 51 15.2	5 34 07.4	
{ 1656+053	16 56 5.650	5 19 46.49	16 57 53.0	5 16 20.9	
{ 1657+05*					1 11.6
2121+053	21 21 14.796	5 22 27.56	21 23 4.4	5 31 56.4	
2122+052	21 22 57.218	5 15 46.80	21 24 50.0	5 25 33.9	

* Для источников, не имеющих аналогов в каталоге Дугласа, смещения определены относительно бли-

Высокая точность определения склонений этим методом на Северном секторе обусловлена двумя факторами: формой диаграммы направленности радиотелескопа и тем, что погрешности прямых восхождений и склонений взаимно независимы.

В данном цикле наблюдений ставилась также задача отработать методику и построить по сильным источникам экспериментальную диаграмму направленности в зоне обзора эксперимента «Холод» для последующего ее использования при обработке материалов этого обзора.

Эксперимент проводился с 1.XII.86 по 15.I.87. Для наблюдений было выбрано 26 достаточно сильных источников в интервале склонений от $\delta_{1950.0} = 4^{\circ}35'$ до $5^{\circ}52'$ и по прямому восхождению от $\alpha_{1950.0} = 1^{\text{h}}40^{\text{m}}$ до $9^{\text{h}}15^{\text{m}}$. В качестве опорных объектов для привязки и уточнения диаграммы направленности были использованы три источника PKS 1548+05, 1656+05 и 2121+05. В табл. 1 приведены координаты всех источников из каталога Дугласа на частоте 365 МГц [11]. Диапазон источников по прямому восхождению был выбран так, чтобы наблю-

Ц А 1
источников

$\Delta\delta = \delta_{\text{набл}} - \delta_{\text{рас}}$		Плотность потока, Ян (РАТАН-600)			Спектраль- ный индекс	Структура источников (Дуглас, $\nu = 365 \text{ МГц}$)	Примечание
		96 ГГц	2.3 ГГц	3.94 ГГц			
7		8	9	10	11	12	13
"	"						
0±	3.6	.688	1.042	1.393	0.0	Т	
23'8	22'0	.228		.082	.6	Т	
40.1	15.0	.528	.202	.156	.84	А Д	
-2'28'2	7'8	.430	.405	.398	.03		
-51.9	11.7	.302	.319	.244	.15	Д	
2.0	3.2	4.1189	1.65	1.073	.98	Т	
-2 10.0	25.5			.074	.86	Д	
1.2	5.4	3.907	1.86	1.122	.9	А Д	Источники имеют, вероятно слож- ную структуру
-3.8	7.6	.881	.728	.433	.32	Д	
-8.8	19.6	1.85	.566	.436	.85	А Д	
.7	3.7	.999	.689	.716	.31	Т	
-.9	2.7	.869	.957	.898	0.0	Т	
15.2	8.5	1.1196	.430	.265	1.03	Д	
9.8	25.0	.601		.163	.98	Д	
52.3	43.7		.193	.049	.36	Д	
-2.1	5.6	1.001	.481	.357	.49	Т	
-28.0	18.8			.085			
34.7	59.0	.214		.104	.5		
-21.5	18.6	.613	.316	.171	.9	Д	Возможно, протя- женный Протяженный
-2.5	12.0	.779	.343	.211	.86	Т	
-1 56.3	19.6	.337		.083	.89	Т	
-19.7	20.8	.356		.069	1.09	Д	
23.4	13.6	.427	.228	.106	.92	Т	
6 44.2	10.6	.331		.206	.42	Д	
11.2	17.2	.204		.108	.67	Д	
-.4	14.2	.726	.283	.164	1.05	Д	
-3 7.2	11.4	.651	.297	.269	.68		
9.2	4.2	.386	.307	.193	.42	А Д	
22.3	13.1	.544	.304	.177	.85	Д	
46.3	47.4	.327		.083	.88	Д	
-4.7	7.7	.617	.358	.244	инв.	Т	
-2.5	1.0	3.04	3.14	3.305	.09	Т	
-42.4	64.6	.306		.051	инв.	Т	
3.3	2.4	2.545	1.49	1.336	.17	Д	
7 32.1	8.6	.658		.168	.93		
-5.0	1.9	1.04		3.150	инв.	Т	
-33.5	26.3	.516		.158	1.0	Д	

жайшего объекта этого каталога.

дения проводились в ночное время суток, когда уровень помех как технических, так и атмосферных значительно понижается.

Наблюдения велись в режиме быстрых перестановок при неподвижном вторичном облучателе с фокусным расстоянием $F=13\ 215$ мм от 5-го репера, $H_{\text{max}}=52^\circ\ 20'$. Наблюдения проводились на волнах 7.6, 8.2, 13.0 и 31.0 см, причем первичный рупор на волну 7.6 см помещался в фокусе, а остальные были вынесены перпендикулярно электрической оси антенны на 1.8λ , 4.4λ и 0.9λ соответственно.

Ряд близких источников, например, такие как 0340+04/0348+04, 0501+05/0502+05, а также некоторые другие наблюдались без перестановки основного отражателя, т. е. один источник в каждой паре выбирался как основной, а другой наблюдался на склонении основного. Каждая пара, как и каждый источник вне пары, наблюдались на пяти сечениях, интервал между которыми составлял 4 мин. дуги, что соответствует собственному интервалу вертикальной диаграммы направленности радиотелескопа на высоте 50° на волне 7.6 см. На каждом сечении было получено около семи кривых прохождения.

В данном цикле наблюдений регистрация производилась впервые на новой системе сбора облучателя № 1. Регистрация проводилась с частотой опроса 10 Гц, затем производилось сжатие в несколько раз в соответствии с шириной диаграммы направленности: на волнах 7.6 и 8.2 см до 0.5 с, на волне 13 см до 0.7 с и на волне 31 см до 0.9 с с одновременной фильтрацией одиночных импульсных помех по методу Ходжеса—Лемана [12]. Сжатые и очищенные таким образом записи архивизировались. Подробное описание новой системы сбора см. в [12]. Затем с помощью гаусс-анализа [13] на каждом сечении определялись видимые прямые восхождения, антенные температуры и полуширины источников. Эти параметры в дальнейшем использовались для определения склонений и плотностей потоков исследуемых объектов (подробнее см. [14]).

Для определения склонений методом сечений может быть использовано несколько способов.

Одним из возможных вариантов определения склонений методом сечений является свертка по вертикали кривых прохождения на нескольких различных сечениях двумерной диаграммой направленности. В нашем случае мы получили информацию, достаточную для построения полной двумерной карты исследуемых объектов, так как значения $T_A(\alpha, \delta)$ известны через интервалы, меньшие или равные собственному интервалу вертикальной диаграммы направленности радиотелескопа. В целях сокращения объема вычислений без ущерба для точности определения координат мы искали положение максимума свертки по склонению радиоизображения объекта с двумерной диаграммой направленности:

$$T_{AF}(Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T_A(X', Y') F(X', Y' - Y) dX' dY';$$

$$T_A = T_B * F = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T_B(X - X', Y - Y') F(X', Y') dX' dY',$$

где $T_B(X, Y)$ — распределение яркостной температуры; $F(X, Y)$ — двумерная диаграмма направленности радиотелескопа. При этом мы не интерполировали наблюдаемые через $4'$ по склонению сечения до дискрета $\Delta\delta = \varepsilon_\delta$, где ε_δ — ожидаемая погрешность в определении склонений, а сделали это только для функции F — один раз для всех радиоисточников этого цикла, пренебрегая малым различием объектов по склонению, а следовательно, и форме F . Помимо выигрыша в объеме счета этот способ оказался и более защищенным от влияния случайных погрешностей в отдельных сечениях — при строгой интерполяции эти погрешности вызывают искажения на соседних сечениях.

Метод может применяться как для точечных источников, так и для протяженных, вплоть до размеров, сравнимых с полушириной вертикальной диаграммы направленности. Для источников малых размеров мы одновременно реализуем и оптимальную фильтрацию, улучшая отношение сигнал/шум. Поиск максимума кривой свертки может быть осуществлен различными способами: вписыванием модельной кривой свертки по методу наименьших квадратов, нахождением центра тяжести и др. В данном случае область около максимального значения кривой свертки представлялась параболой, а положение максимума определялось параметрами этой параболы.

Другой вариант определения склонений методом сечений — метод гауссовых компонент. Программа, позволяющая реализовать этот метод, представляет собой логическое продолжение существующей в настоящее время на РАТАН-600 библиотеки стандартных программ обработки одномерных файлов, каждый из которых является одномерным сканом, полученным при постоянном склонении. Конечным результатом этой обработки является LOG-файл, содержащий параметры гауссовых компонент, соответствующих в идеале данным наблюдений. Как указывалось выше, в результате обработки наблюдательного цикла из n -прохождений для каждого источника получаем набор параметров гауссовых компонент, а именно моментов кульминации, антенных температур и полуширин на каждом из сечений. Если наблюдения проводятся без поперечного выноса, то момент кульминации не зависит от разности высот источника и диаграммы

$\Delta h = h_{\text{диагр}} - h_{\text{ист}}$ и, следовательно, прямые восхождения определяются независимо от склонений. Антенная температура и полуширина кривой прохождения являются функциями разности высот Δh , или, что то же самое, разности их видимых склонений:

$$\begin{aligned} \varphi_{0.5} &= f_1(h_{\text{диагр}} - h_{\text{ист}}); \\ T_A &= T_{\text{пик}} f_2(h_{\text{диагр}} - h_{\text{ист}}). \end{aligned}$$

Функции f_1 и f_2 могут быть определены по опорным источникам либо смоделированы расчетным путем. По наблюдениям источника на нескольких сечениях из набора измеренных величин $\varphi_{0.5}(\Delta h)$ и $T_A(\Delta h)$ могут быть найдены склонение источника и его пиковая температура $T_{\text{пик}}$ по методу наименьших квадратов [15]. При этом для получения линейных условных уравнений использовалось разложение функций $\varphi_{0.5}(\Delta h)$ и $T_A(\Delta h)$ в ряд Тейлора в окрестности точки δ_0 , $T_{\text{пик}0}$, представляющей собой нулевое приближение искомого параметров. Разложение производилось с точностью до членов первого порядка. Решение полученной системы линейных условных уравнений использовалось для того, чтобы найти следующее приближение параметров и т. д., до тех пор, пока продолжала убывать сумма квадратов невязок:

$$M = \sum_{i=1}^n [(\varepsilon_{1i}/\sigma_{1i})^2 + (\varepsilon_{2i}/\sigma_{2i})^2].$$

Функция M подчиняется распределению χ^2 , и ее математическое ожидание равняется $(2n-2)$, где n — число сечений. Ошибки полученных выборочных оценок неизвестных равны диагональным членам матрицы, обратной матрице системы нормальных уравнений в степени $1/2$.

При длительном цикле наблюдений необходимо учесть разность видимых мест источника на разных сечениях, т. е. выполнить приведение координат к средней дате цикла. В данном случае за среднюю дату цикла было принято 4.XII.86. Учет видимых мест производился следующим образом: искомый аргумент метода наименьших квадратов $\Delta h = h_{\text{диагр}} - h_{\text{ист}} = \Delta h_i - (\delta_i - \delta_0)$, здесь i — средняя дата сечения, 0 — средняя дата всего цикла.

В качестве нулевого приближения использовалась максимальная антенная температура и склонение сечения, на котором она достигается.

Остановимся более подробно на погрешностях оценки неизвестных, а также сумме квадратов невязок M -функции. Как уже отмечалось выше, величина M должна подчиняться распределению χ^2 и ее вероятное значение не должно превышать $2n-2$. Однако на практике последнее часто не выполняется. Причин для этого может быть несколько.

1. Принятые функциональные зависимости f_1 и f_2 между измеряемыми величинами $\varphi_{0.5}$ и T_A и аргументом Δh заданы слишком грубо. Так как по некоторым опорным источникам полученные значения M достаточно малы, то эту причину можно исключить из рассмотрения.

2. Источник имеет сложную структуру либо является протяженным, и его наблюдаемые значения $\varphi_{0.5}$ и T_A не удовлетворяют зависимостям f_1 и f_2 , найденным для точечных источников.

3. Одно или несколько наблюдений искажены помехами и дают слишком большие невязки.

4. Принятые значения дисперсий измеряемых величин, которые основываются на небольшом числе экспериментов, неверны. Как следствие этого, кроме большого значения M мы получаем чрезвычайно оптимистические значения погрешностей для неизвестных. Поэтому на практике используется метод увеличения индивидуальных погрешностей, в котором исходные дисперсии σ_j^2 заменяются на

$$(\sigma'_j)^2 = (\sigma_j)^2 \frac{M}{m-r},$$

где m — число условных уравнений, а r — число неизвестных параметров. При этом функция остаточных невязок M будет равна $m-r$, т. е. математичес-

кому ожиданию χ^2 с $m-r$ степенями свободы. Описанная нормировка не имеет строгой математической основы и должна использоваться с осторожностью, так как она подавляет систематические эффекты.

Диаграмма направленности была рассчитана на ЭВМ ЕС 1035 по формулам, приведенным в [16], для $H=51^\circ$ для волны 7.6 см при 225 элементах основной поверхности радиотелескопа. Экспериментальная диаграмма направленности измерялась по ярким опорным источникам 1548+05, 1656+05, 2121+05 и 0146+05 и сравнивалась с расчетом. На рис. 1 и 2 построены расчетные и экспериментальные зависимости полуширин горизонтальных сечений и максимальных антенных температур (вертикальная диаграмма) от разности высот между центральным и боковыми сечениями Δh . Экспериментально установлено, что смещение центра кривых $\varphi_{0.5}(\Delta h)$ и $T_A(\Delta h)$ относительно $\Delta h=0$ оказалось

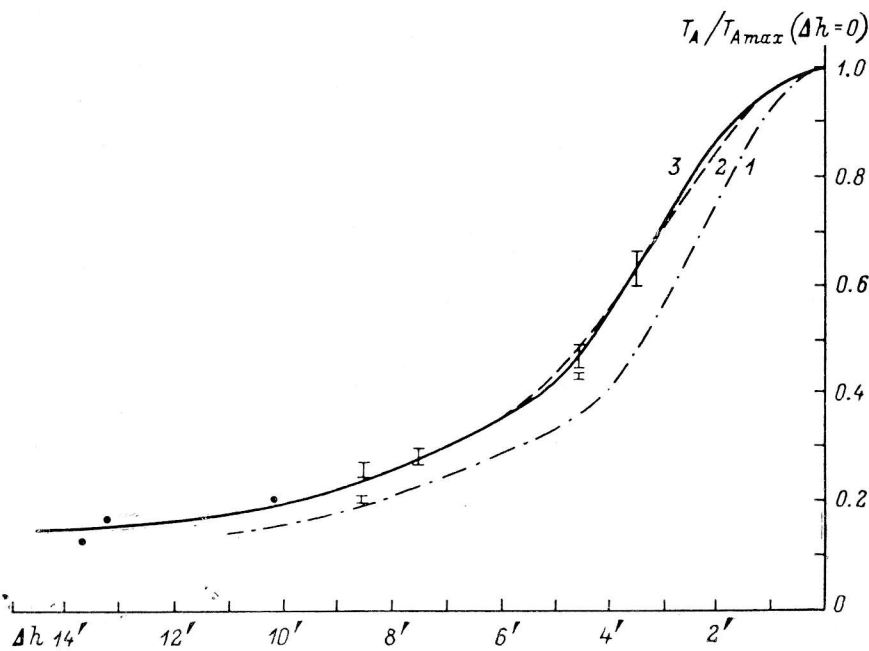


Рис. 1. Вертикальная диаграмма направленности РАТАН-600.

1 — расчетная зависимость $T_{A \max}(\Delta h)$; 2 — эта же зависимость, но расширенная в 1.3 раза по оси Δh ; 3 — вертикальная д. н., измеренная по опорным источникам.

равным -1791 и -1492 для $\varphi_{0.5}$ и T_A соответственно. Для дальнейших расчетов была принята разность в смещении центров кривых $\varphi_{0.5}(\Delta h)$ и $T_A(\Delta h)$ в 0.3 мин дуги. Полученные зависимости были использованы при определении склонений методом гауссовых компонент, а расчетные сечения диаграммы при определении склонений методом свертки.

Плотности потоков на волне 7.6 см определялись по пиковому значению температуры, которая вычислялась одновременно со склонением источника. Точность определения пикового значения температуры составляет $<5\%$. Плотности потоков на волнах 13 и 31 см определялись по среднему значению пиковых антенных температур, измеренных на трех сечениях $\Delta h=0; \pm 4'$. Точность определения антенной температуры на этих волнах лучше $5-10\%$.

Для привязки шкалы плотностей потоков использовались источники с хорошо известными степенными спектрами 0320+05 и 0340+04, наблюдавшие в том же цикле. Значения плотностей потоков для этих источников, принятые для привязки, приведены в табл. 2, там же приведены коэффициенты K связи антенной температуры и плотности потока для точечных источников $T_A K = S$.

По вычисленным значениям плотностей потоков на трех волнах с привлечением данных других авторов в тех случаях, где это возможно, были определены спектральные индексы.

Результаты. Точность определения координат. Потенциальная точность определения координат по прямому восхождению в режиме неподвижного фокуса в данном цикле не могла быть реализована из-за нестабильности частоты опроса в новой системе регистрации, поэтому мы ограничимся обсуждением точности определения склонений.

Уже была отмечена небольшая асимметрия диаграммы направленности, что делает наблюдаемое склонение зависимым от методики. В двух простейших крайних случаях эта величина может быть определена как склонение, при котором кривая прохождения имеет либо минимальную полуширину, либо мак-

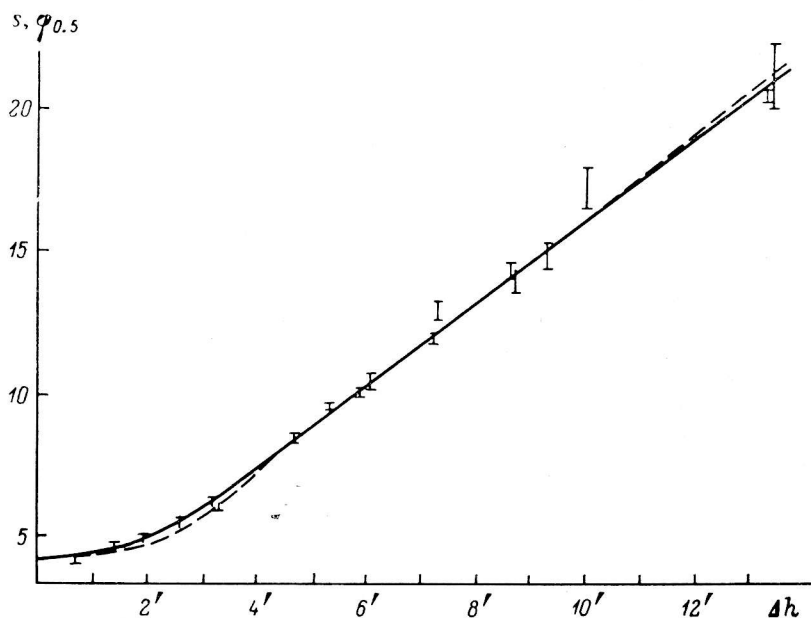


Рис. 2. Отсимметрированная кривая $\varphi_{0.5}(\Delta h)$.

Штриховая линия — расчетная кривая, расширенная в 2.2 раза по оси Δh .

симальную антенную температуру. Эти крайние значения будут отличаться, как было сказано выше, на 18 сек. дуги. Следовательно, все источники, как опорные, по которым производится привязка координат, так и исследуемые, должны обрабатываться по единой методике. При этом необходимо следить за тем, чтобы систематические поправки для источников с разным отношением сигнал/шум в пределах погрешностей совпадали друг с другом.

Методом свертки с использованием теоретической диаграммы направленности были определены разности $\Delta\delta = \delta_{\text{набл}} - \delta_{\text{эфемер}}$ для четырех наиболее ярких источников (табл. 3). Среднее значение $\Delta\delta$ по этим источникам равно -30.2 сек. дуги, среднеквадратическое отклонение, характеризующее точность определения склонений отдельных источников, равно ± 1.6 , а погрешность определения среднего значения ± 0.8 сек. дуги. Следует отметить, что в методе свертки вели-

ТАБЛИЦА 2
К привязке шкалы
плотностей потоков

Источник	S, Ян (7.6 см)	S, Ян (13 см)	S, Ян (31 см)
0320+05	1.05	1.8	3.9
0340+04	1.14	1.8	3.7
K, мЯн/мК	$3.27 \pm .29$	$3.09 \pm .21$	$3.56 \pm .26$

ТАБЛИЦА 3
Определение склонений
методом свертки

Источник	$\Delta\delta$, сек. дуги
0146+056	-30.6
1548+056	-28.1
1656+053	-29.4
2121+053	-32.6

ТАБЛИЦА 4

Определение склонений методом гауссовых компонент

Источники с $300 \text{ мК} \leq T_A \leq 1000 \text{ мК}$		Источники с $100 \text{ мК} \leq T_A < 300 \text{ мК}$	
Источник	$\Delta\delta$, сек. дуги	Источник	$\Delta\delta$, сек. дуги
0146+056	-43.7	0348+045	-49.7
0320+053	-44.3	0425+048	-43.1
0340+048	-44.3	0502+049	-46.6
1548+056	-47.3	0616+051	-47.7
1656+053	-45.4		
2121+053	-48.4		
Среднее	-45.6 ± 0.8		-46.8 ± 1.2
Среднеквадратическая погрешность	± 1.9		± 2.4

чина $\Delta\delta$ характеризует положение центра тяжести теоретической двумерной диаграммы и, как видно из табл. 3, совпадает с положением максимума антенной температуры.

Результаты определения склонений опорных источников методом гауссовых компонент приведены в табл. 4 и 5. При этом в табл. 4 даны индивидуальные значения $\Delta\delta = \delta_{\text{набл}} - \delta_{\text{эфемер}}$ для источников с $T_A \geq 100 \text{ мК}$, а в табл. 5 — средние значения $\Delta\delta$, среднеквадратичные отклонения и ошибки средних $\Delta\delta$ для трех групп источников: источники с $300 \text{ мК} \leq T_A \leq 1000 \text{ мК}$, с $100 \text{ мК} \leq T_A < 300 \text{ мК}$ и с $30 \text{ мК} \leq T_A < 100 \text{ мК}$.

ТАБЛИЦА 5

Точность определения склонений методом сечений.
Метод гауссовых компонент

Диапазон T_A мК	Среднее значение $\Delta\delta$ с учетом систематической ошибки ($-45^\circ.6$)	Ошибка среднего	Среднеквадратическая ошибка
1000—300	0"	± 7.8	± 17.9
300—100	-1.2	± 1.2	± 2.4
30—100	+9.6	± 4.8	± 15.0

Из табл. 4, 5 видно, что: 1) систематические значения $\Delta\delta$ при разных отношениях сигнал/шум в пределах ошибок согласуются друг с другом; 2) систематическая поправка привязки равной -45.6 сек. дуги; 3) координатная точность по склонению для источников с $T_A \geq 100 \text{ мК}$ равна 2 сек. дуги; 4) точность привязки всей системы склонений равна 0.8 сек. дуги; 5) в группе слабых источников с $T_A < 100 \text{ мК}$ точность определения склонений резко снижается, однако анализ остаточных невязок и отбрасывание точек, по которым погрешность значительно превышает 3σ , позволяет в принципе улучшить результаты счета по отдельным источникам и уменьшить среднеквадратическую погрешность для слабых объектов.

Расхождение систематических поправок в методе свертки и методе гауссовых компонент объясняется тем, что в методе гауссовых компонент используется привязка к минимуму полуширины диаграммы (более подробно о расхождении систематических поправок см. [14]).

Окончательные результаты обработки наблюдений приведены в табл. 1. В столбце 1 приведено имя источника, 2 и 3 — координаты источников на эпоху 1950.0 по каталогу Дугласа на 365 МГц, в столбцах 4 и 5 — видимые места на среднюю дату центрального сечения, 6 и 7 — разность видимых координат по α и δ между наблюдаемыми и эфемеридными значениями с учетом систематического сдвига нашего каталога относительно каталога Дугласа.

Далее (столбцы 8—11) приведены плотности потоков этих источников, измеренные на РАТАН-600 в настоящем цикле наблюдений на трех частотах одновременно, а также их спектральный индекс. В столбце 12 приводится классификация источников по каталогу Дугласа: точечный — Т, двойной — Д, асимметричный двойной — АД.

Из табл. 1 видно, что часть источников, такие как 0230+045, 0303+052, 0338+045, 0619+05, 0716+048, 0750+048, 0842+048, 1657+05, имеют поправки по склонению $\Delta\delta$, значительно превышающие погрешности измерения, и поэтому не могут быть отождествлены с источниками каталога Дугласа. Следует отметить также, что на основании анализа остаточных невязок метода гауссовых компонент три из общего числа исследуемых источников заведомо

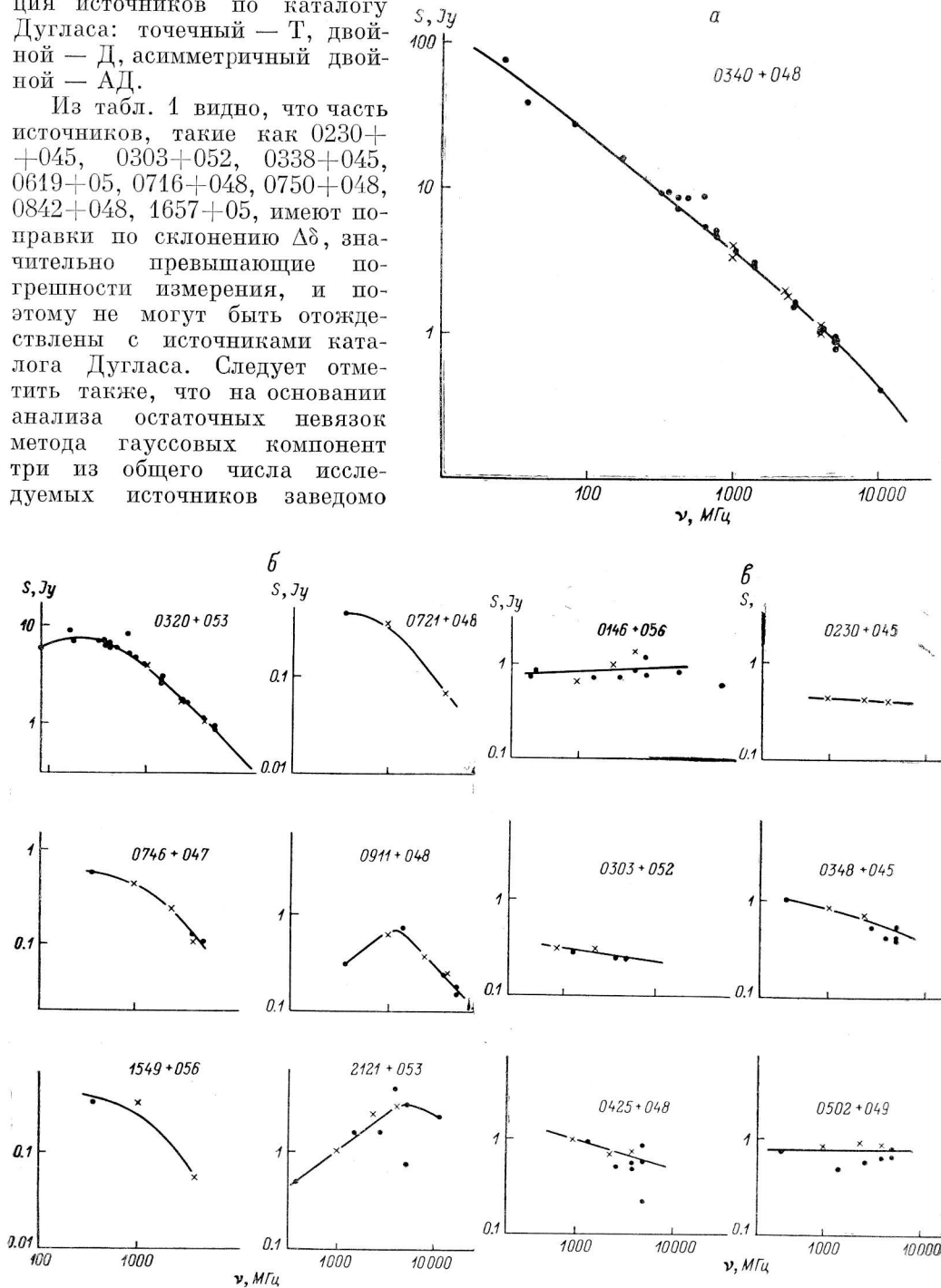


Рис. 3. Спектры радиоисточников.

имеют сложную структуру: 0340+048, 0348+045, 0423+047, однако из-за нестабильности частоты опроса детальный анализ усредненных кривых прохождения с целью исследования их структурных особенностей невозможен.

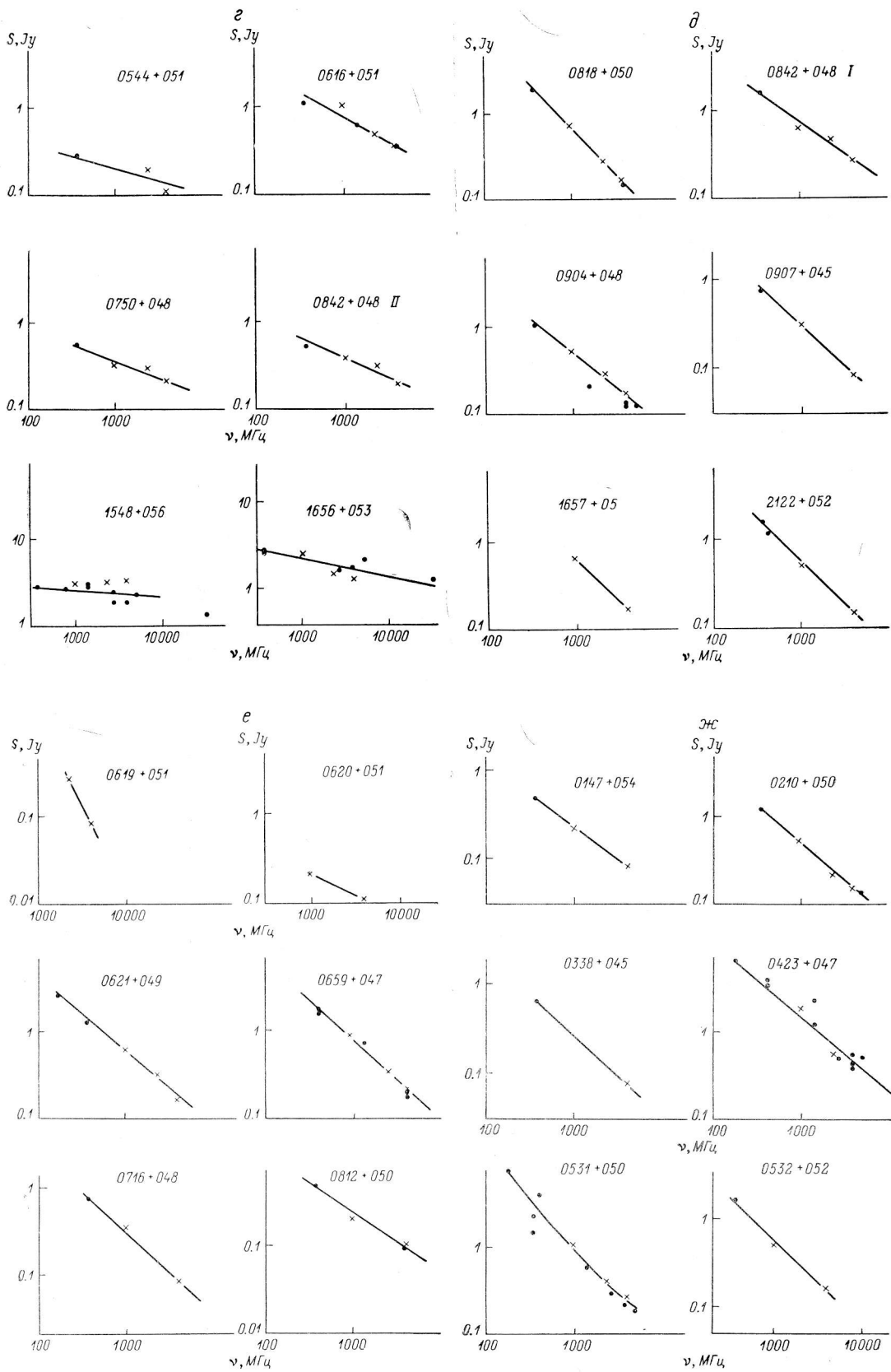


Рис. 3 (продолжение).

Значения $\Delta\alpha$ приведены в табл. 1 только в тех случаях, когда $\Delta\alpha$ значительно превышает полуширину диаграммы направленности по прямому восхождению.

Спектры исследованных источников с использованием результатов наблюдений на РАТАН-600 на трех частотах одновременно, данных каталога Дугласа и других авторов [17—25] приведены на рис. 3. Как видно из табл. 1 и рисунка, 13 объектов из 37 имеют плоский спектр ($\bar{\alpha} < 0.5$) и 4 объекта — инверсионный. Практически все источники с плоскими или инверсионными спектрами являются точечными в каталоге Дугласа. Остальные 20 объектов имеют степенные спектры со средним спектральным индексом 0.89 ± 0.03 , что согласуется с результатами работы [5]. Большинство этих источников по каталогу Дугласа являются двойными и асимметричными двойными.

Остановимся более подробно на источниках, координаты которых сильно отличаются от координат каталога Дугласа.

0230+045. Достаточно предположить, что этот объект имеет крутой спектр ($\bar{\alpha}=1.2$), и на волнах 31, 13 и 7.6 см плотность потока будет ниже порога обнаружения в данном цикле наблюдений. Обнаруженный на РАТАН-600 источник с плоским спектром в пределах ошибок совпадает с координатами объекта каталога ГАИШ [21].

0303+052. Даже в предположении крутого спектра ($\bar{\alpha}=1.2$) источник должен быть виден на всех трех волнах наблюдения. Отсутствие источника с координатами Дугласа говорит, скорее всего, об ошибочности их у Дугласа. Источник, обнаруженный на РАТАН-600, имеет плоский спектр.

0619+051 и 1657+05 отсутствуют у Дугласа, что говорит об инверсионных спектрах этих объектов.

0716+048 — слабый объект. Наши координаты, возможно, неточны.

0750+048 имеет степенной спектр; координаты Дугласа, возможно, ошибочны.

0842+048 — двойной источник. Одна из компонент совпадает с центром тяжести радиовизображения Дугласа. Необходимы наблюдения с большим разрешением.

Основные выводы следующие.

1. Использование метода сечений в режиме неподвижного фокуса позволило существенно улучшить точность определения склонений. Для источников с $T_A \geq 100$ мК на волне 7.6 см при семи записях на каждом сечении точность составляет ~ 2 сек. дуги.

2. Полученное поле ошибок по координатам для указанных объектов, несмотря на некоторое ухудшение точности прямых восхождений в данном цикле наблюдений по сравнению с глубоким обзором «Холод» из-за нестабильности частоты опроса, составило $\Delta\alpha \times \Delta\delta < 6$ квадратных сек. дуги. Такая точность позволяет проводить оптические отождествления источников с $T_A \geq 100$ мК с предельно слабыми объектами, видимыми с помощью 6-м телескопа САО АН СССР.

3. Оказалось, что 8 исследованных объектов имеют координаты, сильно отличающиеся от координат каталога Дугласа, т. е. эти объекты не могут быть отождествлены друг с другом.

4. По измерениям на РАТАН-600 на трех частотах одновременно получены спектры исследованных источников.

5. 20 исследованных объектов из 37 имеют степенные спектры со средним спектральным индексом $\bar{\alpha}=0.89$, из них 7 объектов имеют очень крутые спектры $\bar{\alpha} > 0.9$. 13 исследованных объектов имеют плоские спектры и 4 источника — инверсионные спектры.

6. На волне 7.6 см обнаружено наличие структуры некоторых источников: 0348+045, 0340+048, 0423+047, 0544+051, 0620+05 на масштабах, сравнимых с разрешением на этой волне ($1' \times 8'$).

7. При массовом определении координат слабых объектов применение метода сечений в сочетании с режимом неподвижного фокуса при достаточном отношении сигнал/шум дает хорошие результаты даже без специальных методов контроля стабильности положения вторичного зеркала. Желательно также использовать этот метод не только в меридиане, но и в азимутах.

В заключение хотелось бы отметить, что, несмотря на некоторые недоработки, обнаруженные в ходе эксплуатации, новая система регистрации показала ряд преимуществ по сравнению со старой: пакетный режим заданий, возможность подготовки заблаговременно протокола наблюдений, большая защищенность от импульсных помех в радиометрических каналах, более компактная архивизация.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Ю. Н. Парийскому за активное содействие и постоянный интерес к работе. Авторы благодарят также большой коллектив сотрудников САО, принимавших участие в наблюдениях или обработке материалов наблюдений: К. Д. Алиакберова, Н. Е. Гольцеву, Е. В. Герасименко, В. В. Витковского, Г. В. Ефанову, Ю. К. Зверева, Н. Ф. Каныгину, В. И. Катеневу, М. Л. Моносова, Г. А. Малькову, М. Г. Мингалиева, К. А. Михайлову, М. Н. Наугольную, Т. А. Плясину, Г. С. Поспелову, О. В. Чуканова.

Литература

1. Hall P., Maskau G. D. Faint galaxy number-magnitude counts at high galactic latitude // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1984. 210. P. 979—992.
2. Parijskij Yu. N., Korolkov D. V. The First Deep Sky Survey using the RATAN-600 Radio Telescope // *Astrophysics and Space Reviews Soviet Scientific Reviews Section E* / Ed. R. A. Syunaev. London: Harwood Academic Publishers, 1986. Vol. 5. 400 p.
3. Парийский Ю. Н., Корольков Д. В. Эксперимент «Холод». Первый глубокий обзор неба с помощью радиотелескопа РАТАН-600 // *Итоги науки и техники.* 1986. 31. С. 73—197. (Астрофизика и космическая физика / Под ред. Р. А. Сюняева; ВИНТИ).
4. Парийский Ю. Н., Соболева Н. С. О скоростях разлета компонент радиогалактик // *Письма в Астрон. журн.* 1980. 6, № 2. С. 67—71.
5. Karahi V. K., Kulkarni V. K. The spectral index-flux density relation at 408 MHz and cosmological evolution of extragalactic radio sources // *Astron. and Astrophys.* 1986. 165. P. 39—44.
6. Соболева Н. С., Шиврис О. Н. О возможности наблюдений на АПП источников с различными высотами при неподвижном облучателе // *Сообщ. САО.* 1974. Вып. 12. С. 51—64.
7. Повышение точности и эффективности наблюдений на РАТАН-600 с помощью режима неподвижного фокуса / Н. С. Соболева, А. В. Темирова, Т. Б. Пятунина и др. *Препринт САО.* 1986. № 32 Л.
8. Радиостанции глубокого обзора эксперимента «ХОЛОД» в интервале прямых восхождений $16^h < \alpha < 17^h$, $4^h < \alpha < 5^h$, $0^h < \alpha < 1^h$: Каталог, исследование методики наблюдений и обработки / Ю. Н. Парийский, Н. Н. Бурсов, Р. Вилебинский и др. *Препринт САО.* 1987, № 41 Л.
9. Пятунина Т. Б. Обзор в районе S 68. Опыт автоматической обработки каталога // *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО). 1988. 25. С. 00—00.
10. Наблюдения трех внегалактических радиостанций на волне 1.38 см с разрешением $8''$ / А. Б. Берлин, Ю. В. Корнев, В. Ю. Лесовой и др. // *Письма в Астрон. журн.* 1980. 6, № 8. С. 470—475.
11. Дуглас Дж. Каталог источников на частоте 365 МГц в полосе $\delta = 5^\circ \pm 3'$: Част. сообщ.
12. Система регистрации и предварительной обработки данных облучателя № 1 РАТАН-600 на основе двухуровневого многоаппаратного комплекса / В. В. Витковский, Б. Л. Ерухимов, Г. А. Малькова и др. // *Сообщ. САО.*
13. Иванов Л. Н. Алгоритм оптимального автоматического гаусс-анализа наблюдательных данных // *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО). 1979. 11. С. 213—219.
14. Обработка наблюдений 29 источников каталога Дугласа, проведенных в режиме неподвижного фокуса на 5 сечениях с помощью Северного сектора РАТАН-600 в декабре 1986 г. и январе 1987 г. Исследование точности определения координат и возможности применения метода сечений и метода неподвижного фокуса для массового определения координат слабых объектов / К. Д. Алиакберов, Н. Н. Бурсов, О. В. Верходанов и др. *Отчет,* 1987.
15. Поляризационные характеристики антенны переменного профиля // Н. С. Бахвалов, Л. Г. Васильева, Н. А. Есепкина и др. // *Астрофиз. исслед.* (Изв. САО). 1973. 5. С. 135—142.
16. Брандт З. Статистические методы анализа наблюдений. М.: Мир, 1975. С. 159—192.
17. Dixon R. S. A master list of radio sources // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1970. 20, nr 180. P. 1—7.
18. A catalog of radio sources // H. Kühr, U. Nauber, I. I. K. Pauliny-Toth et al. // *Astron. and Astrophys.* 1981. 45, nr 3. 367 p.
19. GHz observations of sources in the Arecibo 611 MHz survey / C. R. Lawrence, C. L. Bennett, J. A. Garcia-Barreto et al. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1983. 51. P. 67—113.
20. The Mit-Green Bank (MG) 5 GHz survey / C. L. Bennett, C. R. Lawrence, V. F. Burke et al. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1986. 61. P. 1—104.

21. Зеленчукский обзор неба на частоте 3.9 ГГц в диапазоне склонений 0° — 9° / В. Р. Амирханян, А. Г. Горшков, А. А. Капустин и др. // Сообщ. САО. 1985. Вып. 47.
22. Sharp J. R., Bash F. N. Position and flux densities of 1075 radiosources at 365 MHz // Astron. J. 1985. 90, nr 9. P. 1599.
23. 5 GHz radio structure and optical identifications of sources from the MG survey: 11 Maps and finding Charts / C. R. Lawrence, C. L. Bennett, J. N. Hewitt et al. // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1986. 61. P. 105—167.
24. A VLBI survey at 229 GHz // R. A. Preston, D. D. Morabito, J. G. Williams et al. // Astron. J. 1985. Nr 3. P. 1599—1641.
25. Hunsted R. W. Accurate positions of radio sources at 408 MHz // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1972. 157. P. 367—402.

Поступила в редакцию
24 июля 1987 г.