

МНОГОЧАСТОТНЫЕ РАДИОНАБЛЮДЕНИЯ ОСТАТКОВ СВЕРХНОВЫХ В ОБЛАСТИ МЕЖДУ $l=85$ И 135°

С. А. Трушкин, В. В. Витковский, Н. А. Нижельский

Представлены результаты многочастотных наблюдений 14 остатков сверхновых (ОСН), выполненных на радиотелескопе РАТАН-600 в 1985 г. Измерены плотности потоков этих ОСН по крайней мере на двух волнах: 31.3 и 7.6 см. Уточнены радиоспектры некоторых малоизученных ОСН. Приведены одномерные распределения радиояркости по всем исследованным ОСН. Для некоторых ОСН проведено сравнение наблюдательных данных с моделью оптически тонкой, однородной, сферической оболочки.

Приведен список радиоисточников, обнаруженных внутри или вблизи исследованных ОСН. Измерены их плотности потока на самом чувствительном радиометре на волне 7.6 см.

The results of the multi-frequency radio observations of fourteen supernova remnants (SNRs) made with the RATAN-600 radio telescope in 1985 are reported. Flux densities of these SNRs are measured at least at two wavelengths: 31.3 and 7.6 cm. The radio spectra of some SNRs are precised. The one-dimensional brightness distributions of all SNRs are given. A comparison of the observational data with a simple model of uniform, optically thin, spherical shell is made.

The radio sources detected inside or near the SNRs with the flux densities measured in the most sensitive 7.6-cm-radiometer. The spectra of some point sources are discussed.

В настоящее время каталоги галактических ОСН включают около 140 объектов [1, 2]. Часть наиболее ярких источников подробно исследована радиоастрономическими методами в диапазоне от сантиметровых до декаметровых волн. Остальные источники исследованы только на одной—двух длинах волн, но с разной чувствительностью и разным пространственным разрешением, и требуют подтверждения как ОСН. Как известно, в радиодиапазоне основным критерием определения источника в плоскости Галактики как ОСН является наличие трех характеристик: нетеплового спектра, высокой линейной поляризации и достаточно больших угловых размеров. В последние несколько лет каталоги ОСН пополняются источниками как малого углового размера ($\sim 2'$), так и очень протяженными ($\sim 1^\circ$). Низкая поверхностная яркость, неоднозначность выделения на галактическом фоне и путаница с соседними более яркими объектами вызывают определенные трудности при исследовании протяженных ОСН. Многочастотные наблюдения на одном инструменте с достаточно высоким разрешением позволяют в значительной мере избежать этих трудностей и получить более надежные данные и по распределению яркости и по плотности потока. Кроме того, многочастотные наблюдения позволяют выявить спектральные особенности ОСН и источников внутри них.

В рамках перечисленных задач 14 ОСН в области галактических долгот $85-135^\circ$ были исследованы на радиотелескопе РАТАН-600. Большая часть выбранных объектов имеет значительные угловые размеры, и поэтому для определения их плотностей потоков требуется картографирование большой площадки неба. Мы же наблюдали источники в нижней кульминации, т. е. на низких углах места ($5-25^\circ$), когда диаграмма направленности (ДН) радиотелескопа РАТАН-600 имеет ножевую форму с малым горизонтальным размером. Это позволило в одном—трех проходах получить одномерное стрип-распределение яркости по протяженному источнику.

Список исследованных ОСН приведен ниже. Кроме этих источников в исследованную зону попадают еще четыре ОСН: G93.3+6.9, G116.5+1.1, G116.9+

+0.2, G417.4+5.0, имеющие большие угловые размеры, а также хорошо изученный молодой ОСН Cas A.

В связи с открытием новых пульсаров в ОСН и пекулярного объекта SS433 в ОСН W50 компактные источники в ОСН интенсивно исследуются в радио-континууме. В конце статьи мы приводим список обнаруженных источников, их измеренные плотности потоков и спектральные индексы.

Наблюдения

Наблюдения были проведены в январе—феврале 1985 г. на Южном секторе телескопа в режиме прохождения источника в нижней кульминации через неподвижную ДН. В табл. 1 приведены основные параметры антенны и пяти радиометров.

ТАБЛИЦА 1
Параметры антенны и радиометров

ν , МГц	7700	3900	3650	2300	960
λ , см	3.9	7.6	8.2	13.0	31.3
φ''	40	70	75	150	280
θ'	22	43	46	70	165
A_a , м ²	400	600	650	600	620
ΔT_a , мК	15	5	12	30	60
ΔS , мЯн	50	8	15	30	50

Примечание. φ и θ — горизонтальный и вертикальный размеры ДН; A_a — эффективная площадь антенны; ΔT_a — чувствительность радиометров при постоянной времени 1 с; ΔS — чувствительность системы на луч ДН.

В зимних и ночных условиях изменения нулевого уровня были незначительны. Одновременные наблюдения на пяти волнах позволяли контролировать атмосферные условия по короткой волне 3.9 см. В среднем были сделаны три—четыре наблюдения на каждом сечении. Не все источники наблюдались на волне 13 см из-за ремонтных работ радиометра.

Калибровка по плотности потока осуществлялась по четырем источникам, приведенным в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2
Плотности потоков опорных источников, Ян

Источник	λ , см				
	3.9	7.6	8.2	13.0	31.3
3С295	3.93	8.4	8.8	13.7	31.0
3С309.1	2.70	4.16	4.34	6.2	11.0
3С330	—	2.68	2.88	4.36	9.3
3С401	—	1.89	2.01	3.16	7.0

Принятые плотности потока находятся в соответствии со шкалой [3]. Первые три источника наблюдались перед началом цикла, а 3С401 — ежедневно, что позволяло постоянно контролировать состояние антенны. Обработка калибровочных источников проводилась по методике [4]. Точности калибровки по плотности потока на волне 3.9 см — не хуже 10 %, на остальных волнах — лучше 5 %.

Результаты

Чтобы определить плотности потоков ОСН на коротких волнах, для большинства источников приходилось делать несколько сечений на разных склонениях. Мы выбрали шаг по склонению для всех источников равным 20 угл. мин. Эта величина минимальна для определения плотностей потока

на волне 3.9 см и дает возможность исследовать точечные источники в поле ОСН на волне 7.6 см. На волнах 3.9 и 13.0 см не всегда хватало статистики, чтобы определить плотности потоков с приемлемой точностью, поэтому эти значения мы не приводим. Результаты измерений представлены в табл. 3.

В колонке 1 приведено название источника в галактических координатах, в колонке 2 — более распространенное название. В колонке 3 — размеры ОСН из обзора [2]. В колонке 4 даны полные размеры источников по прямому восхождению, измеренные на волне 7.6 см. В колонках 5—9 приведены измеренные плотности потоков с ошибками, определенными индивидуально для каждого

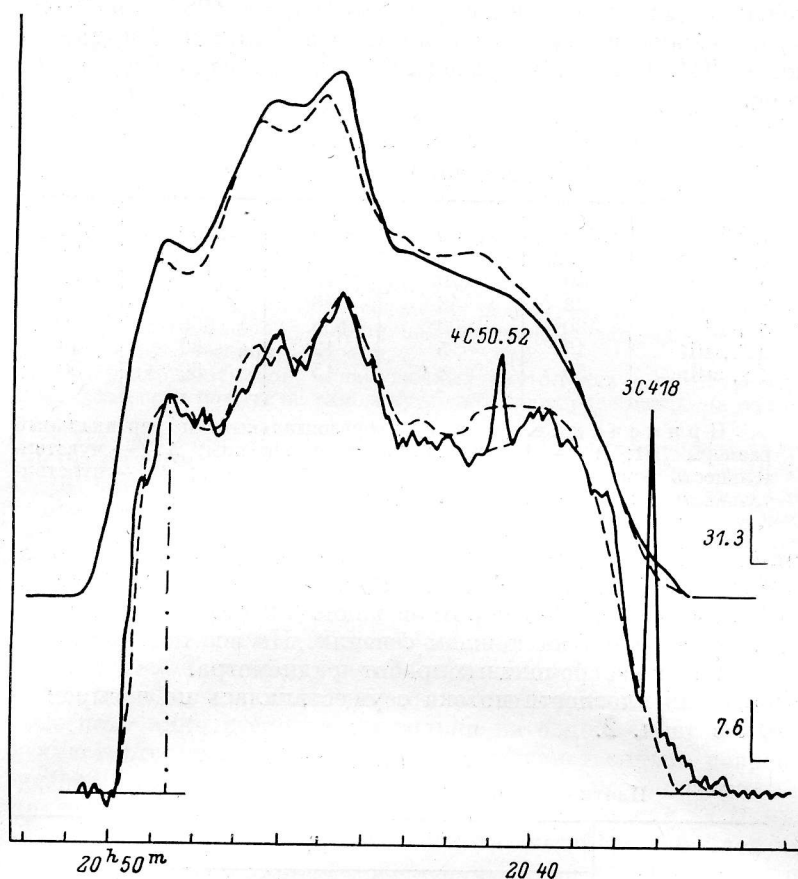


Рис. 1а. Распределение яркости по ОСН HB21 на волнах 31.3 и 7.6 см на центральном сечении $\delta_0 = 50^\circ 29'$.

Точечные источники показаны только на волне 7.6 см. Штрихами показаны сканы, полученные сверткой карты HB21 на волне 11 см [7] с ДН РАТАН-600 на волнах 31.3 и 7.6 см.

источника в зависимости от числа наблюдений и возможности выделения источника на галактическом фоне. В колонке 10 дано число сечений источника на разных склонениях.

В области каждого источника расположено много точечных источников. При определении потоков от ОСН эти источники исключались. Опыт показывает, что высокого разрешения по одной координате достаточно, чтобы эта процедура была однозначной. Источники выделялись набором гауссиан, и эти гауссианы вычитались из записей протяженных источников.

В том случае, если линейная поляризация источника не равна нулю в пределах главного луча ДН, необходимо вносить поправку в значение потока в табл. 3 по формулам из работы [4].

Одномерные распределения яркости на двух волнах (7.6 и 31.3 см) по всем исследованным ОСН показаны на рис. 1—13. На всех рисунках по оси времени отложено прямое восхождение на эпоху 1950.0. На рисунках везде, где не от-

мечено специально, уголками показаны плотности потока, равные $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$. Ниже мы рассмотрим каждый ОСН подробнее.

НВ21. Этот ОСН интенсивно исследовался в радиодиапазоне [5—7]. Виллис [5] привел спектр этого ОСН в диапазоне от 38 до 5000 МГц. Спектральный индекс равен 0.4. Наши точки ложатся чуть ниже интерполированных значе-

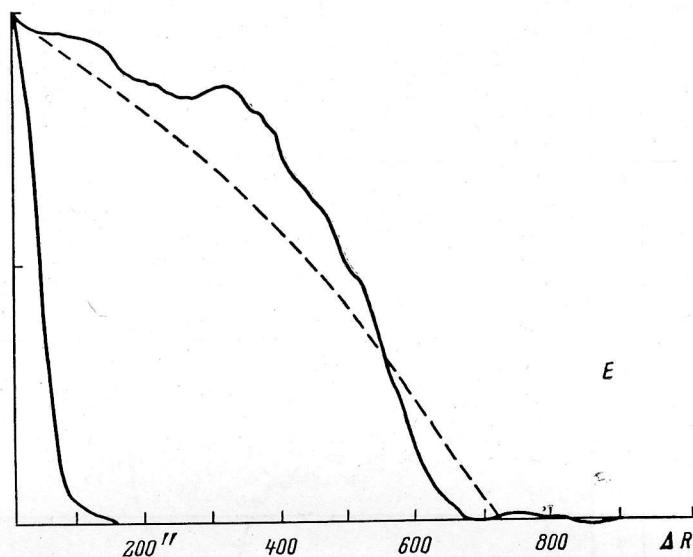


Рис. 16. Распределение яркости на восточном крае НВ21 на волне 7.6 см (отмечено штрихпунктиром на рис. 1а).

Штрихами показан край модельной оболочки, параметры которой приведены в тексте. Слева — отклик на точечный источник.

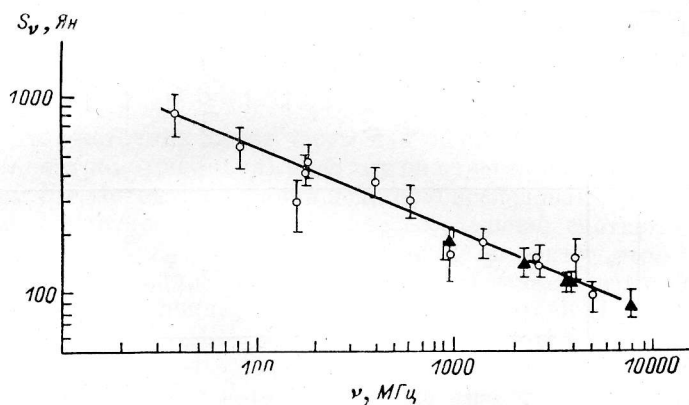


Рис. 17. Спектр НВ21 [5].

Треугольниками показаны измерения, полученные в данной работе.

ний, не изменяя полученного спектрального индекса. Виллис обнаружил систематическое изменение спектрального индекса ($\alpha = 2.7 \div 5.0 \text{ ГГц}$) по источнику.

Сравнение реальных записей и сканов, полученных из свертки карты НВ21 на 11 см [7] с ДН южного сектора РАТАН-600, показывает, что нет значимых изменений спектрального индекса от среднего по источнику в диапазоне 31.3—11 см (рис. 1а). С другой стороны, сравнивая сканы на волнах 7.6 и 11 см, мы пришли к выводу, что для сечения $\delta_0 = 50^\circ 49'$ вся западная часть ОСН имеет более крутой спектральный индекс, чем восточная. Различие достигает значений 0.2—0.3. Виллис [5] нашел как раз обратное изменение индекса, т. е. северо-западная часть остатка имеет более пологий спектр. По-видимому, в обоих случаях малое разнесение частот сравнения не позволяет окончательно доказать или опровергнуть существование изменений спектрального индекса

Плотности потоков остатков сверхновых

Источник	Другое название	Угловые размеры, угл. мин.		Плотности потоков, Ян, на волне, см						Число сечений
		3	4	3.9	7.6	8.2	13.0	31.3		
1	2			5	6	7	8	9	10	
G89.0+4.7	HB24	120×90	415	90±20	115±45	118±15	155±20	190±20	4	
G93.4+1.8	HPA0655	25	46	5.9±0.5	7.0±0.5	7.0±0.5	—	6.8±0.5	2	
G93.7-0.2	CTB104A	70	96	—	17.5±0.3	18.3±0.3	—	45±2	3	
G94.0+1.0	3C434.1	30×20	33	6.7±0.5	9.1±0.3	9.2±0.3	—	14±1	2	
G109.1-1.0	CTB109	25	28	7.5±1.0	12.3±0.3	12.5±0.5	13.8±0.7	22.8±0.6	1	
G112.0+1.0		30?	51.5	—	7.0±1.0	9.0±1.0	14.5±2.0	20±2	3	
G114.3+0.3		90×65	86	—	13.0±2	15±2	20±3	25±1	3	
G119.5+10	CTA1	90	130	—	22±3	26±3	—	36±3	3	
G120.1+1.4	Тихо СН	8	10	15.1±0.5	23.1±0.3	23.6±0.3	32.1±0.5	54.8±0.8	1	
G123.2+2.9		43	50	—	6.9±0.5	7.2±0.5	—	10.4±0.5	1	
G126.2+1.6		70	70.5	—	3.0±0.5	3.0±1	—	9.3±1.5	3	
G127.1+0.5		50	46	—	4.5±0.3	4.3±0.5	10±2	11.4±0.5	3	
G130.7+3.1	3C58	9×5	11	—	31.3±1.0	32.7±1.0	32.3±2.0	33.3±1.5	1	
G132.7+1.3	HB3	75	80	—	33±5	35±5	22.9±2.0	70±5	2	
			02 ^h 16 ^m	9±2	12.5±1.5	14.5±1.5	—	45.0±3.0	2	

по НВ21. Из всех известных ОСН подобное изменение доказано только для Петли в Лебеде.

На рис. 1б показан самый крутой восточный край НВ21. Для сравнения на рисунке приведен отклик ДН на волне 7.6 см на точечный источник. Для определения параметров оболочки ОСН мы использовали модель сферической, оптически тонкой, изотропно излучающей оболочки. Меняя радиус оболочки и ее толщину, мы нашли, что наиболее хорошо подходит к реальному скану оболочка радиусом $60'$ и толщиной $12'$. На рис. 11б показан край такой оболочки. Как подчеркнул Хилл [6], толстая оболочка НВ21 указывает на то, что радиативная стадия для этого ОСН еще не наступила. На рис. 1в показан спектр НВ21 [5] с добавлением наших измерений.

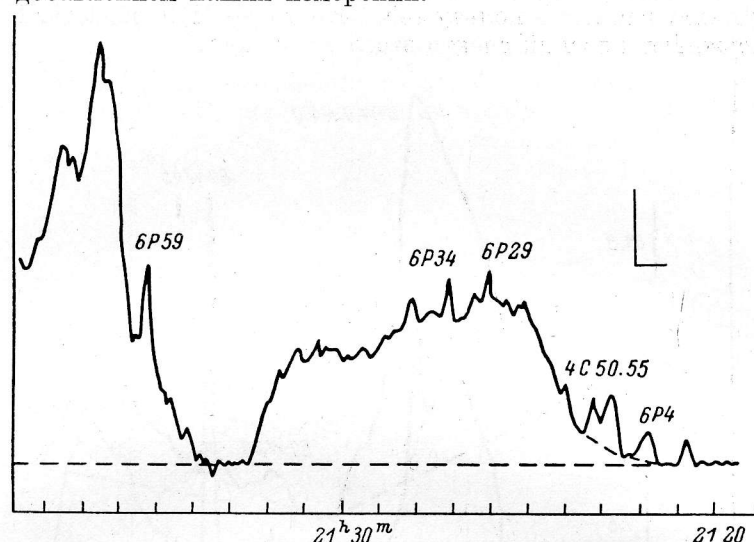


Рис. 2. Распределение яркости по ОСН СТВ104А на волне 7.6 см на сечении $\delta_0 = 50^\circ 29'$.

Отмечены некоторые точечные источники.

СТВ104А. Этот источник имеет черты как оболочечного ОСН, так и остатка с заполненным центром (плериона), поэтому он отнесен к классу ОСН со смешанной структурой [8]. Источник недавно подробно исследован в радиодиапазоне [9, 10]. Измеренные плотности потоков (табл. 3) хорошо соответствуют спектру СТВ104А из работы [9]. На рис. 2 показан скан по центру этого источника на волне 7.6 см. Этот ОСН однозначно выделяется на галактическом фоне. На волнах 7.6 и 31.3 см четко видны выступы за границы ОСН, обнаруженные на западном краю источника [10]. К востоку от СТВ104А расположен мощный тепловой источник G94.5—1.5. Распределение яркости по СТВ104А на волне 7.6 см хорошо соответствует картам на более низких частотах, не показывая значимых изменений спектрального индекса по ОСН. Единственное различие заключается в том, что спектр выступов заметно круче, чем у ОСН, имеющего спектральный индекс $\alpha = 0.34$. Возможно, что за радиоизлучение выступов ответственны релятивистские частицы галактического фона, излучающие в сжатом межзвездном поле. В этом случае спектр излучения будет отличаться от спектра излучения релятивистских частиц внутри ОСН. Ландекер и др. [10] предположили, что существует определенное сходство между ОСН НВ9, НВ21 и СТВ104А. Схожая структура, одинаковые поверхностная яркость и физические размеры и, наконец, близкие спектральные индексы (0.4), лежащие между спектральными индексами плерионов (0.0—0.3) и оболочечных ОСН (0.5—0.7), действительно указывают на близость этих ОСН. Интересно, что аналогичные выступы видны и у НВ21 на карте на волне 11 см [7]. Как отметили авторы [10], такие выступы, по-видимому, являются результатом взаимодействия ударной волны сверхновой с более разреженной межзвездной средой или со средой, имеющей специфическую структуру магнитного поля. Вероятно, специфика пере-

численных ОСН в значительной степени определяется условиями расширения ОСН в сильно неоднородной среде.

НРА0655 и ЗС434.1. Источник ЗС434.1 является оболочечным ОСН с неоднородным распределением яркости. Вероятно, межзвездная сфера между этим ОСН и СТВ104А более плотная, чем общее окружение, так как именно по линии, соединяющей эти ОСН, наблюдается максимальный градиент яркости на краю обоих ОСН. Измеренные плотности потоков из табл. 3 в пределах ошибок измерений соответствуют интегральному спектру ЗС434.1 [11]. Западная часть этого ОСН почти смыкается с источником НРА0655, природа которого неясна. Плоский радиоспектр и отсутствие четкой связи обнаруженной линейной поляризации в направлении НРА0655 [12] со структурой источника являются серьезными аргументами в пользу того, что это — Н II-область. Наши измерения подтверждают плоский спектр этого источника.

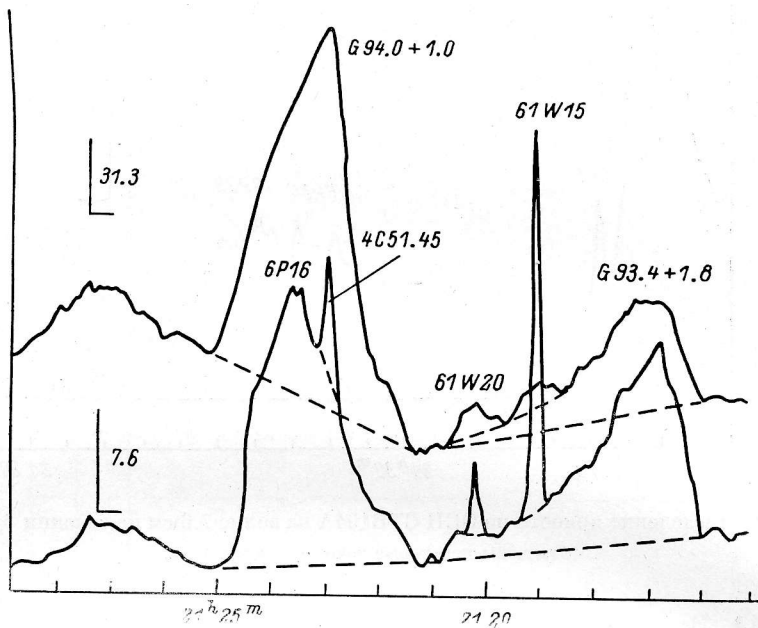


Рис. 3а. Распределение яркости по источникам $G\ 94.0 \pm 1.0$ и $G\ 93.4 \pm 1.8$ на волнах 31.3 и 7.6 см на склонении $\delta_0 = 51^\circ 50'$.

Отмечены точечные источники.

На рис. 3а показаны сканы по центру ОСН ЗС434.1 и НРА0655 на волнах 31.3 и 7.6 см. На этих кривых проходов хорошо выделяется несколько точечных источников. При определении потока от ЗС434.1 на волне 31.3 см из интегрального потока ОСН был вычтен экстраполированный из спектра поток источника 4C51.45 (61W34), равный 1.21 Ян. Источник 61W15 виден на всех волнах, кроме волны 13 см. На рис. 3б показан спектр этого источника. Были использованы данные из [11] на частотах 608, 1720 и 4750 МГц. Характер спектра ясно указывает на тепловую природу этого источника. Методом наименьших квадратов вписана зависимость

$$S_\nu(z) = Az^2 \cdot 1.582(1 - e^{-z^{2.1}}),$$

где $z = \nu$ МГц/1844, $A = 640$ мЯн.

Интересно отметить, что на волне 7.6 см источник 61W15 имеет разрешаемое гало с размером около $5''$, что также характерно для Н II-областей.

Негепловой источник в центре ОСН ЗС434.1, имеющий название 6P16 [10], в наших наблюдениях разрешается на два компонента, и наши измерения позволили получить спектральный индекс $\alpha = 0.67 \pm 0.07$, который заметно круче, чем у остатка, где $\alpha = 0.44 \pm 0.04$ [11]. Так как источник 6P16 расположен вблизи центра ОСН, то требуются более подробные его исследования. Протяженная

деталь в центре 3C434.1, видимая на волне 21 см [10], может быть связана с этим источником.

СТВ109. В центре этого ОСН расположен рентгеновский пульсар IЕ2259+586 [13] с периодом 6.978 с. СТВ109 интенсивно исследовался в радио- и рентгеновском диапазонах [14]. Грегори и др. [15] отметили, что к западному краю остатка примыкает молекулярное облако. В этом облаке расположено несколько ярких компактных Н II-областей. Полукруглая форма СТВ109, вероятно, объясняется соседством с этим облаком. Возможно, существует и более глубокая эволюционная связь ОСН и облака. В молекулярном облаке идет формирование молодых массивных звезд, и вспышка одной из них, вероятно, привела к образованию ОСН СТВ109. Как известно, именно вспышки молодых массивных звезд (СН II) приводят к образованию нейтронных звезд — пульсаров. Возможно, ускорение эволюции молодой звезды связано с ее кратностью. В двойной системе перетекание вещества с одного компонента на другой приводит к изменению временной шкалы эволюции звезды.

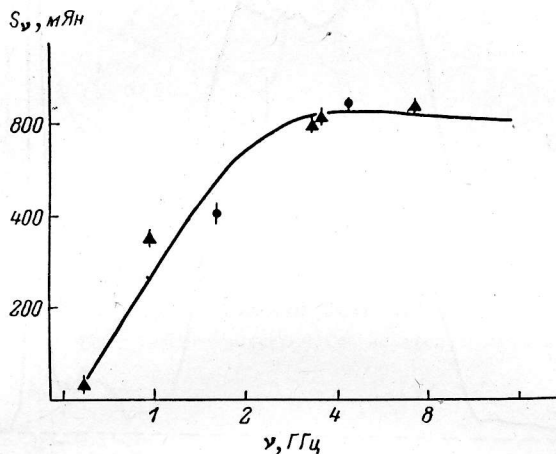


Рис. 36. Спектр источника 61W15 по данным из работы [11] (точки) и по измерениям из этой работы (треугольники).

Вписан стандартный тепловой спектр.

На рис. 4 показаны сканы по центру СТВ109 на волнах 31.3 и 7.6 см. К западу от ОСН расположены две Н II-области из каталога Шарплесса S152 и S153, ассоциируемые с молекулярным облаком. На других кривых прохождений видны Н II-области S148+S149. Вблизи S152 расположен слабый источник, вероятно, тоже компактная Н II-область. Все слабые детали на карте СТВ109 на волне 6 см из [15] хорошо отождествляются с деталями на сканах на волне 7.6 см. Это дает основание утверждать, что слабый выступ излучения на восточном краю ОСН, видимый как «подложка», тоже реален. Выступ имеет нетепловой спектр, по измерениям на волнах 31.3 и 7.6 см спектральный индекс равен 1.3, что значительно круче, чем у ОСН, где $\alpha=0.5$. На рис. 4 это особенно контрастно по отношению к западному краю, где спектр «подложки» тепловой, поэтому излучение здесь более яркое на волне 7.6 см, чем на волне 31.3 см. Выступ на восточном краю СТВ109, вероятно, аналогичен выступам у ОСН СТВ104А.

Наши измерения плотностей потоков хорошо соответствуют спектру СТВ109 [14]. Все Н II-области из каталога Шарплесса имеют плоский спектр на высоких частотах, характерный для оптически тонкой области теплового спектра.

G112.0+1.2. Этот нетепловой источник из Болонского обзора [16] расположен в очень сложной области Галактики [17]. Этот источник совпадает со слабой оптической туманностью S161. Рядом расположены яркие Н II-области S158, S159, S162, которые исследовались в радиодиапазоне в работах [18—20]. Данные по спектру источника противоречивы, по-видимому, из-за неоднозначности выделения источника на галактическом фоне. На рис. 5а показаны сканы по источнику на волнах 31.3 и 7.6 см. По склонению мы выделяли источник так же,

как в работе [16], причем ДН на волнах 31.3 и 7.6 см были сравнимы: $4.5' \times 160'$ и $4.2' \times 110'$ соответственно. На рис. 5а штриховкой отмечена область, по которой определялись плотности потока. То, что измерения потоков от Н II-областей хорошо согласуются с имеющимися данными [20], показывает, что такое выделение источника G112.0+1.2 отражает действительность. На рис. 5б штрихами показан спектр G112.0+1.2 по данным [16] и спектр, полученный из наших измерений. Оба спектра имеют почти одинаковые спектральные индексы: 0.64 и 0.69 соответственно. Но по оси потоков различаются почти в 3 раза. Это, вероятно, связано с тем, что полный размер источника по прямому восхождению на волнах 7.6 и 31.3 см значительно больше, чем получено в [16], но совпадает с размерами оптической туманности S161. С другой стороны, трудно отделить

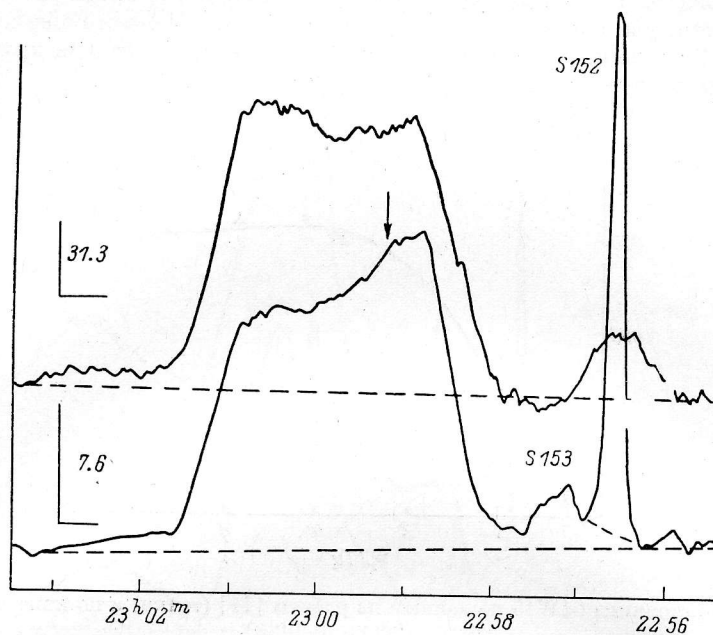


Рис. 4. Распределение яркости по ОСН G109.1—1.0 на волнах 31.3 и 7.6 см на сечении $\delta_0 = 58^\circ 37'$.

Стрелкой показано прямое восхождение рентгеновского пульсара. Рядом с ОСН расположены компактные Н II-области S152 и S153.

сигнал от S158. В [18] поток от S158 в 1.5 раза больше, чем следует из интегрального спектра [20]. В этом случае, вероятно, низкий поток от G112.0+1.2 обусловлен недостаточным разрешением.

Наши измерения подтверждают нетепловую природу источника G112.0+1.2, но дают в 3 раза большую яркость источника. Требуются оптические наблюдения по обнаружению высокоскоростной оболочки в направлении S161.

G114.3+0.3. Этот источник обнаружен в обзоре плоскости Галактики [17] на волне 21 см и был подробно исследован в работе [21] на волне 11 см. В [21] показано, что этот источник имеет очень низкую поверхностную яркость и высокую степень линейной поляризации излучения, до 40 % на 11 см. Деполяризация излучения между волнами 11 и 21 см достигает 20 %. Самым ярким из десяти источников малого углового размера в области G114.3+0.3 является Н II-область S165, которая проецируется на ОСН из заднего фона Галактики [21]. По данным [21] ОСН G114.3+0.3 — самый слабый по поверхностной яркости из всех известных ОСН.

На рис. 6 приведены распределения яркости по центральному сечению ОСН на волнах 31.3 и 7.6 см. Из записей был вычтен довольно значительный линейный фон. Источник имеет четкие границы, характерные для оболочечных ОСН. Наши измерения показывают, что оболочка имеет большую толщину — 30—40 % от радиуса оболочки. Приведенные в табл. 3 плотности потоков со-

вершенно не согласуются с измерениями в [21, 22]. Анализ влияния дальних боковых лепестков, в которые может попадать излучение от яркого ОСН Cas A, показывает, что искажения нулевого уровня составляют меньше 10 % по отношению к измеренной плотности потока. Завышение потоков в наших измере-

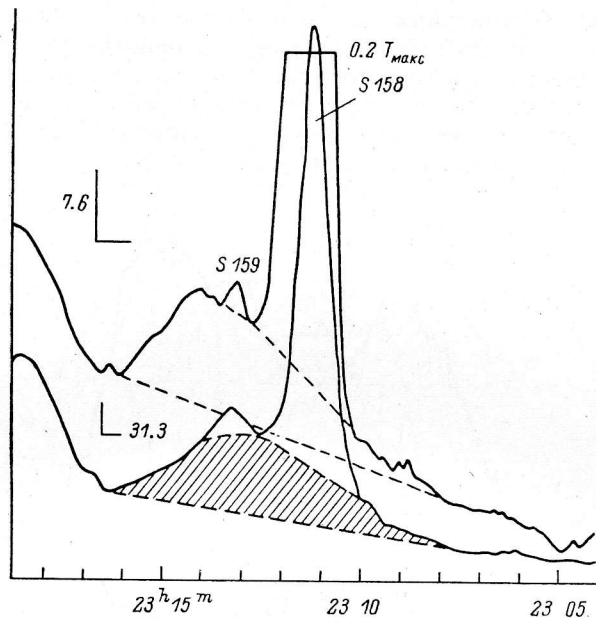


Рис. 5а. Распределение яркости в окрестности ОСН G112.0+1.2 на волнах 7.6 и 31.3 см. Этот источник выделен пунктиром и штриховкой. Сечение сделано на склонении $\delta_0=61^\circ 40'$.

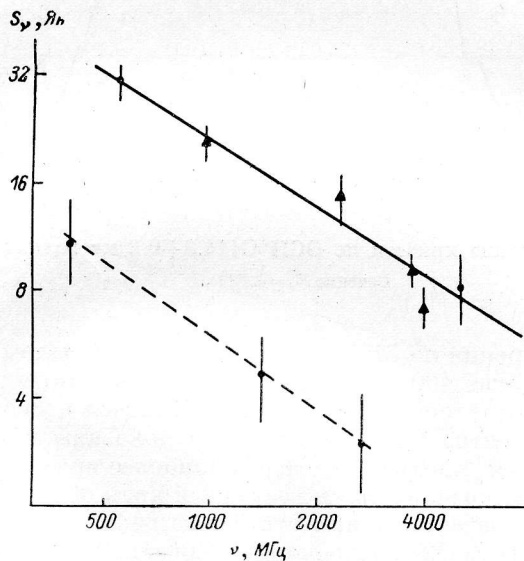


Рис. 5б. Спектр G112.0+1.2, полученный в данной работе и в работе [16] (штрихи). Точки, полученные в данной работе, помечены треугольниками.

ниях может происходить из-за неучета вклада поляризованной составляющей в видимый поток. При поляризации 50 % это дает коэффициент около 1.25. Так как данные по поляризации источника на высоких частотах отсутствуют, мы не можем точно оценить погрешности измеренных плотностей потоков. С другой стороны, надо отметить, что при расстоянии до ОСН 3—3.8 кпк и эквивалентном диаметре $97'$ [21] поток на частоте 408 МГц должен быть равен 64 Ян, если воспользоваться Σ - D -зависимостью из [23]. Другими словами, интерпо-

лированная из данных [21, 22] поверхностная яркость $G114.3+0.3$ на этой частоте не согласуется с $\Sigma-D$ -зависимостью из [23].

Результаты наших измерений подчеркивают необходимость новых наблюдений в широком диапазоне длин волн. Для уточнения потоков необходимы измерения линейной поляризации на высоких частотах.

СТА1. Этот источник подробно исследован в работах [24, 25]. В последней работе показано, что его спектральный индекс, определенный методом «точка — точка» по двум картам на 150 и 2695 МГц, равен 0.47, в то время как компилятивный спектр из шести точек дает другое значение: 0.30 ± 0.05 . В связи с этим остается нерешенным вопрос об изменении спектрального индекса на низких

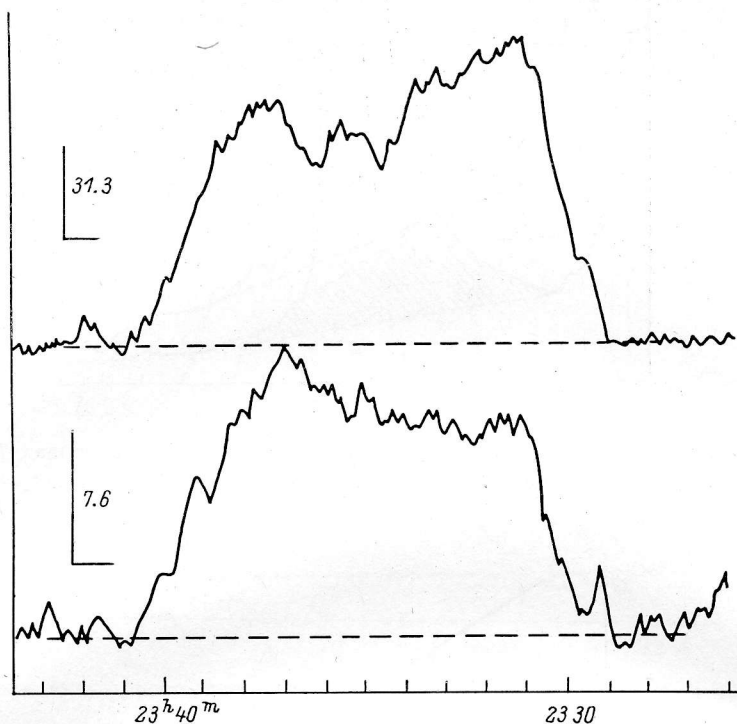


Рис. 6. Распределение яркости по ОСН $G114.3+0.3$ на волнах 31.3 и 7.6 см.
Сечение $\delta_0 = 61^\circ 30'$.

частотах. Наши измерения на 31.3 см показывают, что излом спектра возможен только на частотах ниже 400 МГц. Требуется дополнительные измерения на частотах ниже 80 МГц, чтобы окончательно убедиться в существовании низкочастотного излома спектра СТА1. На рис. 7а показаны кривые прохождений СТА1 по двум сечениям, проходящим через наиболее яркие области этого ОСН. На верхнем скане хорошо выделяется восточный край оболочки СТА1. Полученные одномерные распределения яркости по источнику хорошо соответствуют карте СТА1 на волне 11 см [25], не обнаруживая значимых изменений спектрального индекса по источнику. Наши измерения согласуются с интегральным спектром СТА1 из [25], как показано на рис. 7б.

Внутри СТА 1 расположена известная планетарная туманность NGC40 с обычным тепловым спектром. Из оценок расстояний до нее и до СТА1 следует, что планетарная туманность является источником переднего фона для СТА1 [24].

ОСН Тихо. Этот исторический ОСН в последнее время подробно исследовался в радиодиапазоне. Спектр уточнен в [27], спектральный индекс равен 0.61 ± 0.03 . Наши измерения хорошо соответствуют этому спектру. Радиокарты Тихо, полученные с высоким разрешением, обнаруживают малые детали с размерами меньше 0.1 от радиуса ОСН [26]. Для интерпретации радио- и рентгеновских наблюдений был численно смоделирован взрыв белого карлика, окружен-

ного планетарной туманности. По мнению авторов [27], только такая модель позволила объяснить тонкий ободок, видимый в некоторых частях радио- и рентгеновской карт ОСН Тихо.

На рис. 8а приведен скан по источнику на волне 7.6 см. Мы сравнили этот скан с распределением яркости по ОСН Тихо на волне 2.8 см [26]. ДН в этих наблюдениях сравнима с ДН РАТАН-600 по прямому восхождению на волне

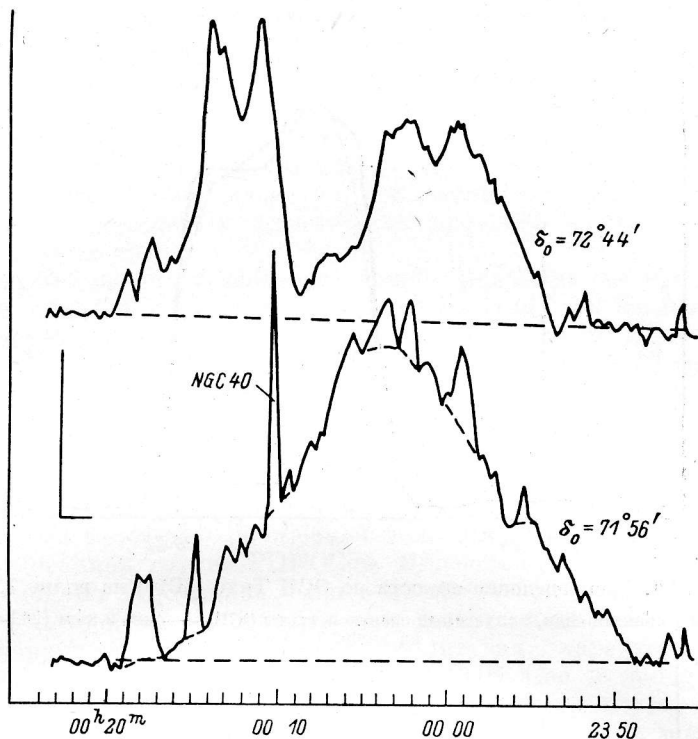


Рис. 7а. Распределение яркости по ОСН СТА1 на волне 7.6 см на двух сечениях.

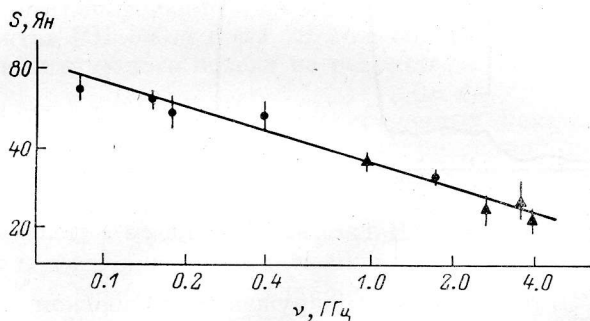


Рис. 7б. Спектр СТА1 по измерениям данной работы и из [25].

7.6 см. На рис. 8а штриховой линией показана свертка карты на волне 2.8 см с расчетной ДН на волне 7.6 см. Имеется значимое различие распределений яркости на краю ОСН. Это можно интерпретировать как укрупнение спектра во внешних частях оболочки ОСН, но это противоречит выводам [26], где из сравнения карт на 610 и 10700 МГц показано, что таких изменений спектрального индекса нет.

На рис. 8б в большом масштабе показана область вблизи ОСН Тихо. На волне 7.6 см обнаружена область повышенного излучения вне основной оболочки. Это излучение, по-видимому, имеет нетепловой спектр, так как оно не обнаружено на волне 3.9 см. Возможно, это излучение возникает перед фронтом ударной волны, проходящей через неоднородную межзвездную среду. Так как интенсив-

ность этой «подложки» падает с уменьшением длины волны, то влияние антенных эффектов маловероятно. Динамический диапазон РАТАН-600 на низких углах наблюдений по крайней мере лучше 30 дБ.

Сравнение полученных одномерных распределений яркости с моделью однородной и изотропно излучающей оболочки показывает, что лучше всего соответствует нашим наблюдениям оболочка радиусом 240 и толщиной 45 угл. сек. Эти значения близки к параметрам оболочки, полученным в [26, 28].

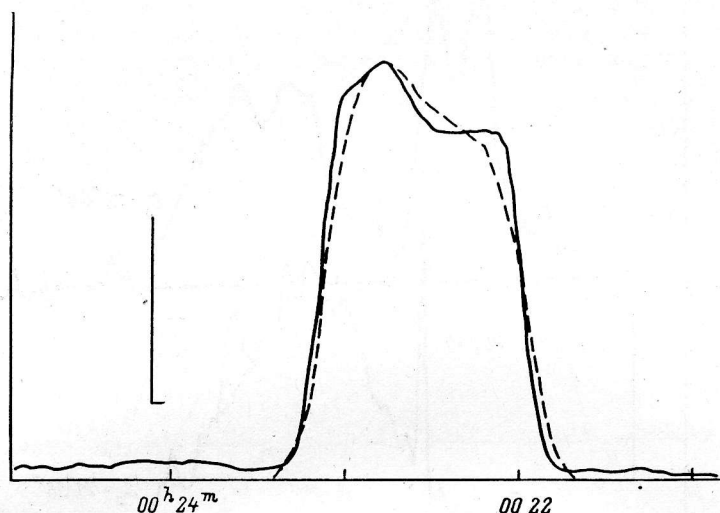


Рис. 8а. Распределение яркости по ОСН Тихо (3С10) на волне 7.6 см.

Штриховой линией показан скан, полученный сверточной карты ОСН на волне 2.8 см [26] с ДН РАТАН-600 на волне 7.6 см.

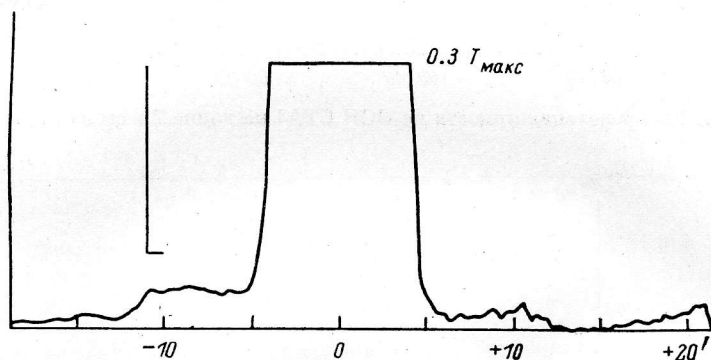


Рис. 8б. «Подложка» под ОСН Тихо на волне 7.6 см в увеличенном масштабе.

G123.2+2.9. Этот источник обнаружен в Болонском галактическом обзоре [16]. Он совпадает по положению со слабой оптической туманностью S183. На красных снимках Паломарского обзора неба туманность показывает присутствие пылевого поглощения, имеется волокнистая структура, присущая оболочечным ОСН.

На рис. 9а показаны распределения яркости по источнику на волнах 7.6 и 31.3 см. Из рисунка видно, что есть значительное излучение в центре источника, поэтому ОСН G123.2+2.9, вероятно, принадлежит к типу ОСН со смешанной структурой [8]. Данные измерений плотностей потоков на разных волнах собраны на рис. 9б. Наши измерения на волнах 7.6 и 8.2 см показывают, что спектр источника более пологий, чем получено в [16]. Спектральный индекс равен 0.28 ± 0.07 . На рис. 9б штриховой прямой показан спектр источника с таким спектральным индексом. Его промежуточное значение между спектральными индексами плерионов и нормальных оболочечных ОСН является еще одним свидетельством в пользу того, что это ОСН смешанного типа.

G126.2+1.6. Этот оболочечный ОСН обнаружен в обзоре Галактики на волне 21 см [17]. Более подробно G126.2+1.6 был исследован на волнах 11 и 6 см [29]. Источник имеет очень низкую поверхностную яркость. Используя Σ - D -зависимость [23], авторы [29] получили $D=70 \pm 120$ пк, что указывает на значительный возраст ОСН. Радиоспектр этого источника обладает двумя интересными особенностями. Существует низкочастотный излом спектра на 400 МГц, и спектр имеет завал на частотах, больших 3000 МГц. Последний, вероятно, связан с сильным сжатием межзвездного поля и сильными синхро-

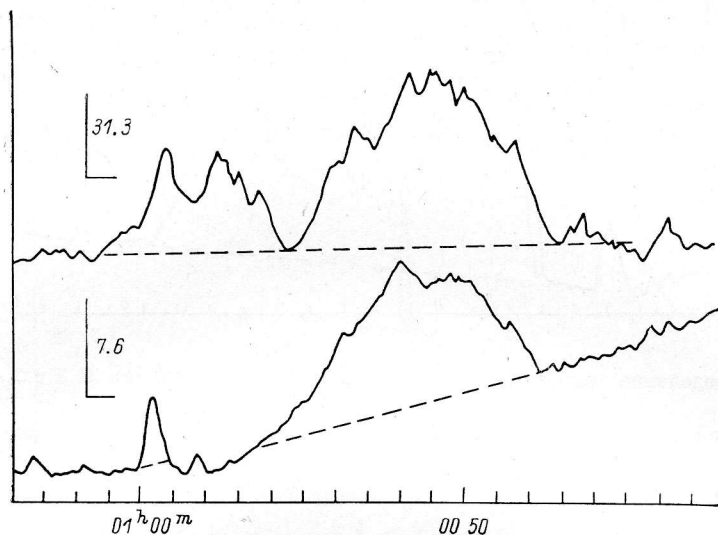


Рис. 9а. Распределение яркости по ОСН G123.2+2.9 на волнах 7.6 и 31.3 см. Сечение $\delta_0 = 65^\circ 30'$.

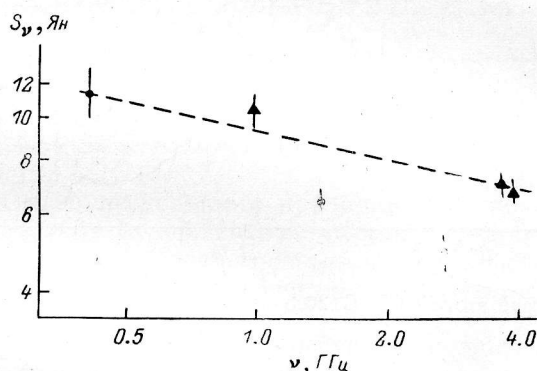


Рис. 9б. Спектр G123.2+2.9, построенный по измерениям данной работы и работ [16, 18, 19].

тронными потерями в более ранние периоды эволюции ОСН, как это интерпретируется для спектра ОСН Петля в Лебедь [20]. При этом возраст G126.2+1.6 должен составлять несколько сотен тысяч лет.

На рис. 10а показаны распределения яркости по центру этого ОСН на волнах 7.6 и 31.3 см. Хорошо выделяется оболочечная форма с максимальной яркостью вблизи края, где толщина излучающего газа тоже максимальна. Мы провели сравнение с моделью однородной и изотропно излучающей сферической оболочки. На рис. 10а штриховой кривой показано распределение яркости оболочки радиусом 36 и толщиной 10.8 угл. мин., которое наиболее хорошо соответствует наблюдениям на волне 7.6 см. Но и в этом случае, как видно из рисунка, модель плохо совпадает с реальным распределением яркости в центре ОСН. Чтобы получить лучшее совпадение, необходимо привлекать модели с неизотропным излучением. Например, в модели с регулярным радиальным магнитным полем в центре ОСН получится значительно больший провал в распределении яркости. Такая модель использовалась при интерпретации радиальной за-

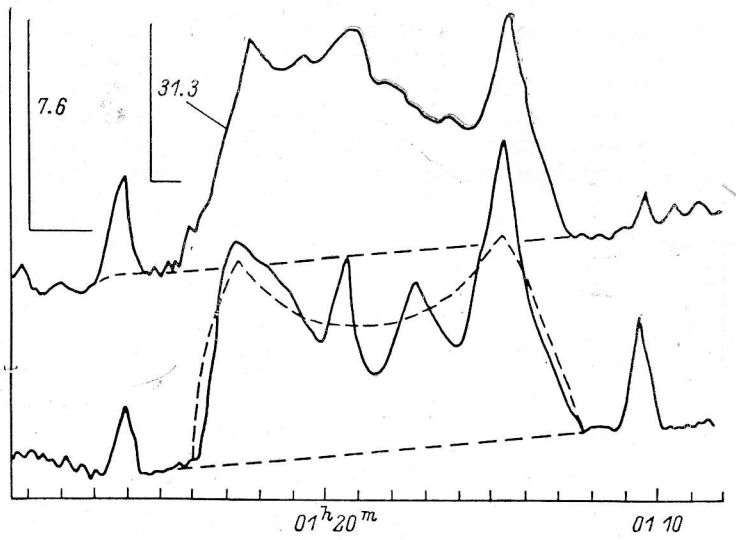


Рис. 10а. Распределение яркости по источнику G126.3+1.6 на волнах 31.3 и 7.6 см, сечение $\delta_0=64^{\circ}04'$. Штриховой кривой показано распределение яркости по модельной оболочке, параметры которой приведены в тексте.

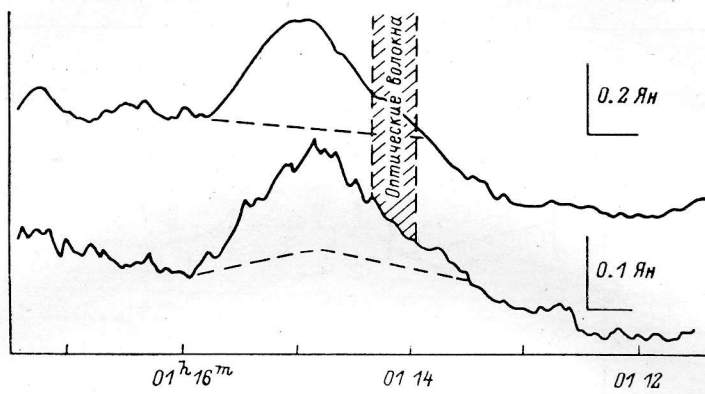


Рис. 10б. Западный край этого ОСН G126.3+1.6, где обнаружены оптические волокна.

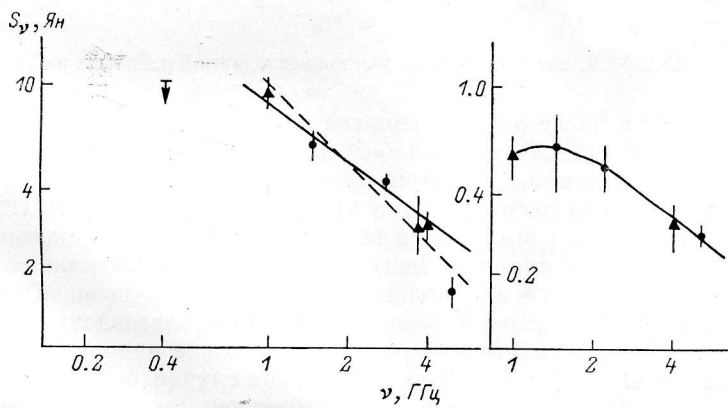


Рис. 10в. Спектр ОСН G126.2+1.6, построенный по измерениям данной работы и [21], то же — для волокна, показанного на рис. 10б.

висимости радиояркости ОСН Cas A [31]. Надо отметить, что в случае применения любой модели толщины оболочки составляет значительную часть радиуса ОСН, что указывает на то, что адиабатическая фаза расширения для G126.2+1.6 еще не закончилась.

На рис. 10б показано распределение яркости на волне 7.6 см вдоль западного края ОСН, где обнаружены оптические волокна. Максимум излучения «радиоволокна» смещен к центру G126.2+1.6 относительно оптических волокон. На рис. 10в показан спектр ОСН, сплошная линия проведена без использования измерений на 6 см [29], штриховая — по всем точкам. В первом случае спектральный индекс равен $\alpha=0.71\pm 0.06$, во втором $\alpha=0.95\pm 0.07$. Справа на рис. 10в показан спектр «радиоволокна», выделенного штрихами на рис. 10б. Спектр имеет излом на частоте около 100 МГц, на высоких частотах спектральный индекс равен 0.7, как у всего ОСН. Низкочастотный излом или завал спектра

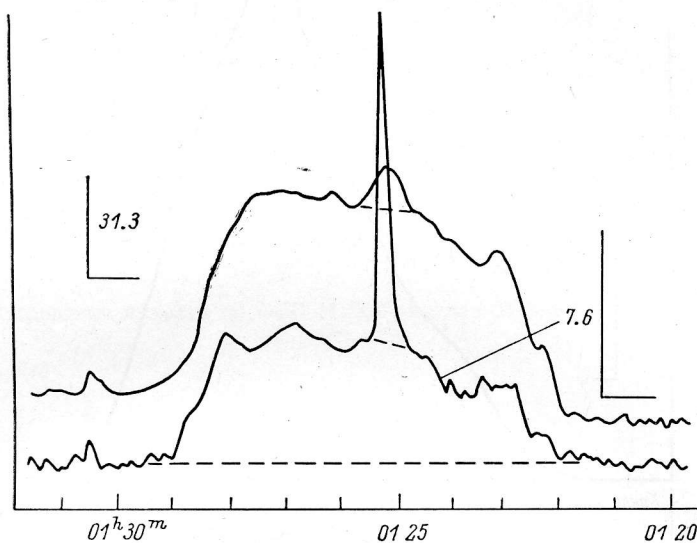


Рис. 11. Распределение яркости по ОСН G127.1+0.5 на волнах 31.3 и 7.6 см.

Сканы сделаны по склонению центрального источника G127.11+0.54; $\delta_0=62^\circ 51'$.

может быть обусловлен несколькими причинами. Тепловые электроны могут вызвать такой завал, если их концентрация составляет $100-500 \text{ см}^{-3}$ и они располагаются перед или внутри «радиоволокна». Возможно, спектр релятивистских электронов имеет обрыв на низких энергиях, вызванный столкновительными потерями энергии.

Необычные свойства G126.2+1.6 требуют дополнительных исследований в широком диапазоне длин волн.

G127.1+0.5. Этот оболочечный ОСН интенсивно исследовался в радиодиапазоне [29, 32, 33]. Главной его особенностью является яркий точечный источник G127.11+0.54, расположенный в центре оболочки. До сих пор нет единой точки зрения относительно происхождения этого источника. Он имеет плоский спектр на частотах выше 2000 МГц и является переменным на высоких частотах [33]. Наши измерения плотностей потоков в пределах 10 % соответствуют спектру этого источника из работы [33].

На рис. 11 приведены кривые прохождений по центру G127.1+0.5 на волнах 7.6 и 31.3 см.

3С58. Этот ОСН — наиболее яркий представитель класса плерионов, ОСН с заполненным центром. Он, по-видимому, является остатком исторической сверхновой 1181 г. Этот источник подробно исследован в радиодиапазоне на антеннах апертурного синтеза [34]. На рис. 12 приведен скан по центру источника 3С58 на волне 7.6 см, внизу дана карта ОСН на волне 21 см [34]. Сравнение распределений яркости на этих волнах показывает, что нет значимых изменений спектрального индекса вдоль источника. Наши измерения подтверждают плоский спектр 3С58. Не обнаружено излучение, выходящее за известные границы ОСН

с пределом по поверхностной яркости $\Sigma_{06} < 3 \cdot 10^{-21}$ Вт/(м²·Гц·ср) на масштабах от 6 до 20' по угловому размеру вдоль оси прямого восхождения на волне 7.6 см.

НВЗ. Этот ОСН расположен вблизи газово-молекулярного комплекса W3/4/5. НВЗ имеет четкую оболочку с более яркой частью, примыкающей к этому комплексу. НВЗ исследовался в широком интервале длин волн [12, 22]. На рис. 13а показано распределение яркости по источнику на волнах 31.3 и 7.6 см. К востоку от НВЗ расположен тепловой источник W3 (на рисунке не показан). В табл. 3 приведены измерения плотностей потоков от всего ОСН, зона прямых восхождений: 02^h08^m—02^h20^m и от его части, зона от 02^h08^m до 02^h16^m, где нулевой уро-

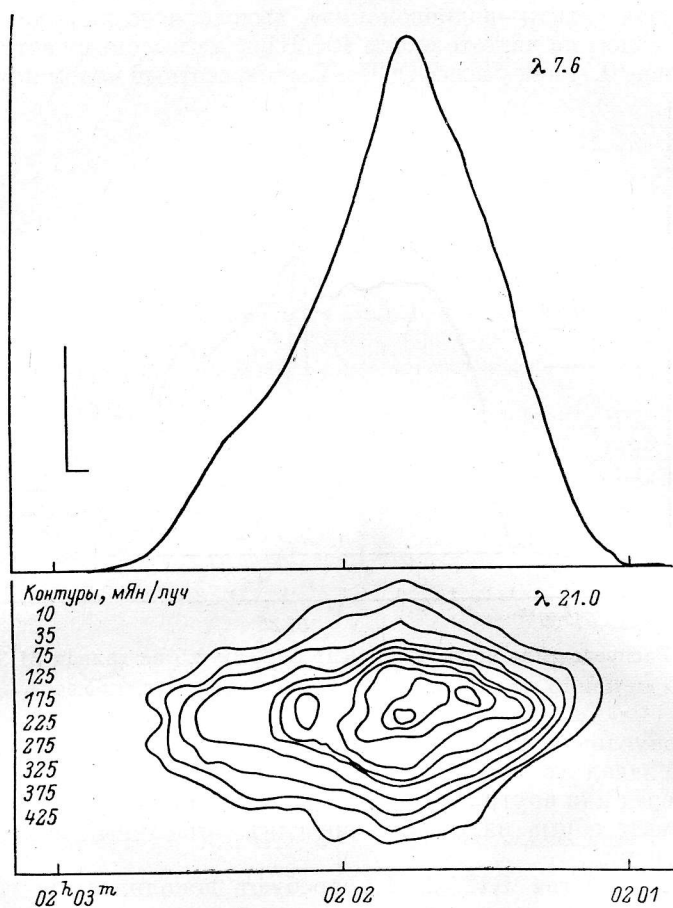


Рис. 12. Распределение яркости по 3C58 на волне 7.6 см и карта этого ОСН на волне 21 см [34].

Луч имеет размеры 20×20 угл. сек.

вень сигнала проводится наиболее надежно. На рис. 13б построены спектры обеих областей, для всего НВЗ использованы данные из [12, 22], спектральный индекс равен $\alpha = 0.49 \pm 0.03$, в то время как западная часть остатка имеет более крутой спектральный индекс: $\alpha = 0.85 \pm 0.10$. Это различие может быть обусловлено или неучтенным вкладом теплового источника W3 на высоких частотах, или разными условиями распространения ударной волны через неоднородную межзвездную среду около комплекса W3/4/5.

Источники малого углового размера. При исследовании ОСН обнаружено много точечных источников, значительная часть которых является фоновыми внегалактическими объектами. Возможность образования звездного остатка во время взрыва сверхновой неоднократно обсуждалась. По современным теориям нейтронные звезды, пульсары рождаются только при вспышках сверхновых II типа. При вспышках СН I типа взрываются маломассивные звезды. Они, по-

видимому, не оставляют звездных остатков. Звездных ОСН обнаружено значительно меньше, чем газовых оболочек ОСН [35].

Не существует прямого метода определения расстояний до источников в радиоконтинууме. Поэтому одним из возможных косвенных методов нахождения связи ОСН с точечным радиоисточником является обнаружение схожих свойств

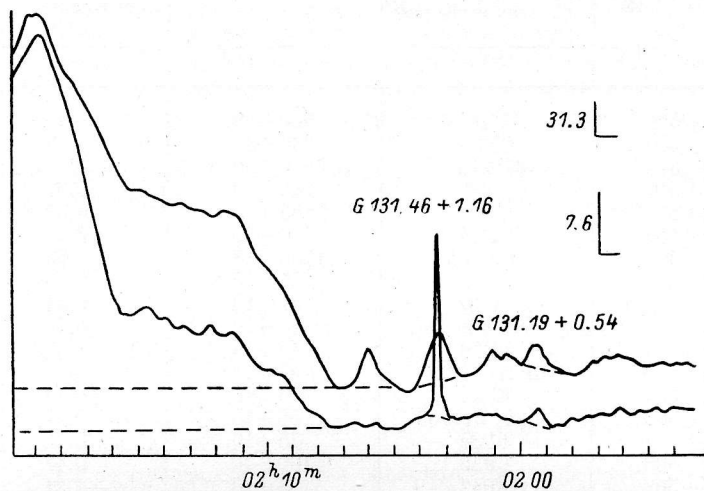


Рис. 13а. Распределение яркости по ОСН НРЗ на волнах 31.3 и 7.6 см, сечение $\delta_0=62^\circ 15'$.

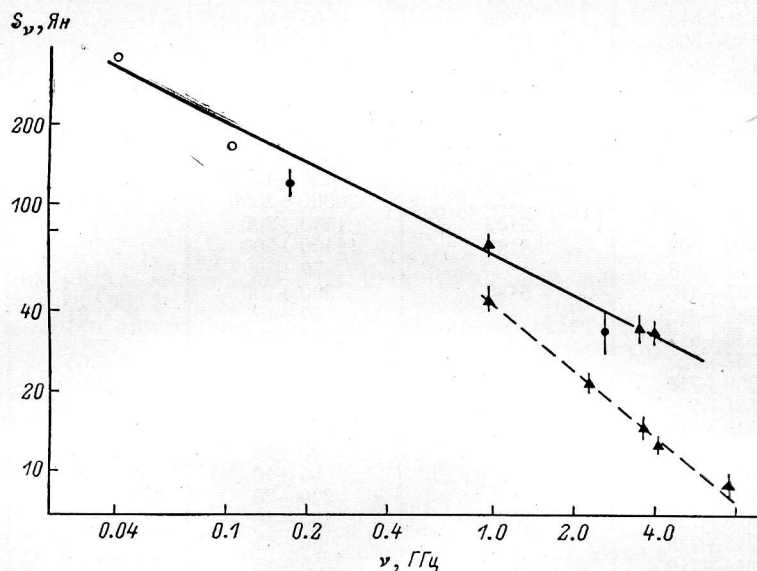


Рис. 13б. Спектр НВЗ, построенный по измерениям данной работы и по точкам из [12, 22], — сплошная прямая.

Штриховой прямой показан спектр части НВЗ, описанной в тексте.

их радиоспектров, исследование поляризации и переменности. Естественно, особое внимание необходимо уделять объектам, расположенным вблизи видимого центра ОСН.

В табл. 4 приводится список источников, обнаруженных на волне 7.6 см вблизи или внутри исследованных ОСН. В колонке 1 — название источника в Паркской системе обозначений, в колонке 2 приведены отождествления с обзорами на других волнах, ссылки на которые даны в колонке 5. В колонке 3 даны плотности потоков с ошибками, в колонке 4 — спектральные индексы там, где их можно вычислить ($S \sim \nu^{-\alpha}$). Тепловые спектры с завалом на низких частотах обозначены буквой *T*.

ТАБЛИЦА 4

Источники малого углового размера

№ п/п.	Название источ- ника	Другое название	S (3900 МГц), мЯн	Спектральный индекс	Ссылка
	1	2	3	4	5
1	2037+511	3C418	4000±200	0.4	6, 7
2	2040+506	4C50.52	330±30	1.15	7
3	2119+517	61W15	820±50	T	11
4	2120+519	61W20	245±30	0.07	11
5	2121+510	6P4	155±15	0.37	10
6	2122+519	4C51.45	440±30	0.76	10, 11
7	2122+507	4C50.55	1900±180	0.59	11
8	2123+517	6P16	97±15	0.64	10
	A	61W37	57±10	0.64	11
	B	61W38	40±10	0.55	11
9	2124+504	6P19	45±15	1.30	10
10	2124+511	6P21+6P22	45±15	—	10
11	2125+504	6P25	30±10	-0.14	10
12	2125+503	6P29, 32W33	55±10	0.17	9, 10
13	2127+504	6P34	75±10	0.75	10
14	2127+508	6P35	100±10	0.47	10
15	2128+503	6P42	35±10	-1.21	10
		6P43	45±10	-1.26	10
		6P44	20±10	0.6	10
16	2130+499	6P51	100±15	0.45	10
17	2131+515	6P54	40±10	0.73	10
18	2132+508	6P55	60±10	0.46	10
19	2135+508	6P59	910±100	0.32	10, 15
20	2253+582	S147	110±30	T	12, 14
21	2254+582	S148+S149	1130±50	T	12, 14
22	2255+584		110±10	—	
23	2256+585	S152	1670±50	T	12, 14
24	2257+584	S153	430±10	T	12, 14
25	2311+612	S158	26000±2000	0.00	15, 18, 19
26	2314+608	S159	1480±200	T	15, 18, 19
27	2319+609	S162	11400±500	T	15, 18, 19
28	2333+618		70±20	0.0	20
29	2337+616	S165	900±100	T	20
30	2338+612		50±15	0.81	20
31	2338+618		300±100	—	20
32	2347+723		85±15	0.63	22
33	2350+719		45±15	0.0	22
34	2351+725		30±10	0.64	22
35	2353+718		35±10	0.96	22
36	2355+717		95±15	0.80	22
37	2357+722		55±10	0.67	22
38	2359+719		220±20	—	
39	0010+722	NGC40	470±50	T	22
40	0014+728		60±15	1.16	22
41	0014+719	4C71.1	155±15	1.01	22
42	0017+721		75±15	0.93	22
43	0018+729		400±100	0.69	22
44	0119+638		60±10	0.86	29
45	0122+639		60±15	0.67	29
46	0123+633		90±15	0.28	27, 28, 29
47	0125+628	G127.11+0.54	410±30		27, 28, 29
48	0125+640		68±16	0.0	29
49	0127+627		50±15	0.84	29
50	0130+627		45±15	0.71	29
51	0133+627		90±20	0.80	29
52	0159+620	4C62.04	130±90	0.67	15
53	0203+625		860±90	0.67	15

Некоторые сильные источники были обнаружены и на других волнах, тогда спектральные индексы определялись по всем имеющимся измерениям.

Заключение

Многочастотные исследования ОСН, обсужденные в этой работе, обнаружили некоторые новые особенности распределения яркости по этим ОСН и уточнили их пространственные и энергетические характеристики.

Высокое разрешение по одной координате и высокая чувствительность по яркостной температуре протяженных деталей обеспечили надежные измерения плотностей потоков, которые оказались принципиально важными для некоторых ОСН.

Авторы благодарны Ю. Н. Парийскому за ценные замечания и постоянное внимание к работе, а также С. А. Чеху за помощь в отладке программ на ЭВМ ЕС 1035.

Литература

1. Milne D. K. A new catalogue of galactic supernova remnants corrected for distance from the galactic plane // *Austral. J. Phys.* 1979. 32. P. 83—98.
2. Green D. Statistical studies of supernova remnants // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1985. 209. P. 449—478.
3. The absolute spectrum of Cas A. An accurate flux density scale and a set of secondary calibrators / J. W. M. Baars, R. Genzel, I. I. K. Pauliny-Toth, A. Witzel // *Astron. and Astrophys.* 1977. 61. P. 99—106.
4. Определение плотностей потоков радионисточников на комплексе широкополосных радиометров сплошного спектра радиотелескопа РАТАН-600/К. Д. Алякберов, М. Г. Мингалиев, М. Н. Наугольная и др. // *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*. 1985. 19. с. 60—64.
5. Willis A. G. Observations of galactic supernova remnants at 1.7 and 2.7 GHz // *Astron. and Astrophys.* 1973. 26. P. 237—255.
6. Hill I. E. Observations of the supernova remnant HB21 at 1.4 GHz // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1974. 169. P. 59—69.
7. High resolution measurements of the supernova HB 21 at a frequency of 2.7 GHz / G. G. T. Haslam, Keen N. J., W. E. Wilson, D. A. Graham, P. Thomasson // *Astron. and Astrophys.* 1975. 39. P. 453—454.
8. Weiler K. W. The Crab nebula is not alone Observatory. 1983. 103. P. 85—106.
9. Further observations of radio sources from the BG survey. I: The non-thermal sources near $l=94^\circ$ / F. Mantovani, M. Nanni, C. J. Salter, P. Tomassi // *Astron. and Astrophys.* 1982. 105. P. 176—183.
10. Landecker T. L., Higgs L. A., Roger R. S. High-resolution radio observations of the supernova remnants CTB 104A (G93.7—0.3) and 3C434.1 (G94.0+1.0) // *Astron. J.* 1985. 90. P. 1083—1093.
11. High resolution observations of extended radio sources near $l=94^\circ$ / W. M. Goss, F. Mantovani, C. J. Salter, P. Tomasi, T. Velusamy // *Astron. and Astrophys.* 1984. 138. P. 469—476.
12. Velusamy T., Kundu M. R. Observations of intensity and linear polarization in supernova remnants at 11 cm wavelength. — *Astron. and Astrophys.* 1974. 32. P. 375—390.
13. Fahlman G. G., Gregory P. C. An X-ray pulsar in SNR G109.1—1.0 // *Nature*. 1981. 293. P. 202—204.
14. Extended radio observations of the SNR CTB 109 / V. A. Hughes, R. H. Harten, C. H. Costain, L. A. Nelson, M. R. Viner // *Astrophys. J.* 1983. 283. P. 147—153.
15. Comparison of radio and X-ray observations of SNR G109.1—1.0 / P. C. Gregory, R. Braun, G. G. Fahlman, S. F. Gull / IAU symposium 101. Supernova remnants and their X-ray emission / Ed. P. Gorenstein, J. Danziger. Dordrecht: Reidel, 1983. P. 437—443.
16. Bonsignori-Facondi S. R., Tomasi P. Evidence for six new low surface brightness supernova remnants // *Astron. and Astrophys.* 1979. 77. P. 93—100.
17. Kallas E., Reich W. A 21 cm radio continuum survey of the galactic plane between $l=93^\circ$ and $l=163^\circ$ // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1980. 42. P. 227—243.
18. Felli M., Churchwell E. Radio emission at 1400 MHz from galactic HII regions // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1972. 5. P. 369—432.
19. Churchwell E., Walmisley C. M. Observations of optical nebulae at 2695 MHz // *Astron. and Astrophys.* 1973. 27. P. 117—124.
20. Israel F. P., Habing H. J., de Jong T. Aperture synthesis observations of HII regions. I: A group of HII regions around $l=111^\circ$ // *Astron. and Astrophys.* 1973. 27. P. 143—160.
21. Reich W., Braunsfurth E. B. 2.8 GHz observations of the three old supernova remnants CTB1, G116.5+1.1 and G114.3+0.3 with the Effelsberg 100-m telescope // *Astron. and Astrophys.* 1981. 99. P. 17—26.
22. Глушак А. П., Коноваленко А. В., Удадьцов В. А. Старые остатки сверхновых по наблюдениям в метровом диапазоне // 15 Всесоюзная конференция по

- галактической и внегалактической радиоастрономии: Тез. докл. Харьков, 1983. С. 123—124.
23. Caswell J. L., Lerche I. Galactic supernova remnants: dependence of radio brightness on galactic height and its implications // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1979. 187. P. 201—220.
 24. Sieber W., Haslam C. G. T., Salter C. J. Continuum observations of the supernova remnant CTA 1 at 2695 MHz // *Astron. and Astrophys.* 1979. 74. P. 361—368.
 25. Sieber W., Salter C. J., Mayer C. J. Spectral and polarization characteristics of the supernova remnant CTA 1 // *Astron. and Astrophys.* 1981. 103. P. 393—404.
 26. Observations of the remnant of Tycho's supernova (3C10) at a frequency of 10.7 GHz / U. Klein, D. T. Emerson, C. G. T. Haslam, C. J. Salter // *Astron. and Astrophys.* 1979. 76. P. 120—123.
 27. Dickel J., Jones E. M. The evolution of Tycho's supernova remnant // *Astrophys. J.* 1985. 288. P. 707—716.
 28. Duin R. M., Strom R. G. A multi-frequency study of the radio structure of 3C10, the remnant of Tycho's supernova // *Astron. and Astrophys.* 1975. 39. P. 33—42.
 29. Fürst E., Reich W., Steube R. Radio continuum observations of the supernova remnants G127.1+0.5 and G126.2+1.6 at 11 cm and 6 cm wavelength // *Astron. and Astrophys.* 1984. 133. P. 11—18.
 30. Dickel J. R., Willis A. G. The radio emission of the supernova remnants CTB 1 and the Cygnus Loop // *Astron. and Astrophys.* 1980. 85. P. 55—65.
 31. Rosenberg I. A high-resolution map of Cassiopeia A at 2.7 GHz // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1970. 147. P. 215—230.
 32. Caswell J. L., G127.1+0.5 — a remarkable supernova remnant centred on a very compact source? // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1977. 181. P. 789—797.
 33. Salter C. J., Pauls T., Haslam C. G. T. Continuum observations of supernova remnant G127+0.5 at 2695 MHz // *Astron. and Astrophys.* 1978. 66. P. 77—80.
 34. Wilson A. S., Weiler K. W. The brightness and polarization structure of the suspected supernova remnant 3C58 at centimetre wavelength // *Astron. and Astrophys.* 1976. 49. P. 357—374.
 35. Helfand D. J., Becker R. H. Observations of stellar remnants from recent supernovae // *Nature.* 1984. 307. P. 215—221.

Поступила в редакцию
3 февраля 1986 г.