

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР
Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

П р е п р и н т № 234

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
КРАСОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

Барabanов А. П.
Иванов В. П.
Станкевич К. С.
Столяров С. П.

Горький 1967

Барбанов А.П., Иванов В. П.,
Станкевич К.С., Столяров С.П.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ. Горький, Препринт
№ 234 / НИРФИ, 1986, 25 с.

УДК-523.164.4

Обнаружено изменение спектрального индекса Крабовидной туманности на эпоху 1984.0 в диапазоне 0,5-10 ГГц на 0,044, что составило 14% от начальной величины. Показано, что спектр источника не менялся существенно с 1953 по 1974 гг. По-видимому, изменения в спектре Краба начались после 1975 г. и носят нерегулярный характер.

В 1977 г. было обнаружено уменьшение плотности потока Крабовидной туманности на частоте 927 МГц /30/. Исследования на ряде длин волн сантиметрового и дециметрового диапазонов показали, что на эпоху 1981 г. уменьшение мощности радиоизлучения Крабовидной туманности в среднем по спектру составило 3,5% /31,32/. При равномерном уменьшении потока средняя скорость составила бы $(0,2 \pm 0,06)\%$ в год, но, вероятно, имели место нерегулярные изменения после 1975 года. Абсолютные измерения в 1983–1984 гг., о которых сообщается ниже, показали, что эффект носит более сложный характер: наряду с изменением интенсивности обнаружено уменьшение спектрального индекса источника. Исследованию радиоизлучения Крабовидной туманности в различные эпохи посвящена настоящая работа.

Для выявления эволюции потоков и спектра радиоизлучения источника нужны мгновенные спектры на различные эпохи, в том числе и за предыдущие годы. В прошлом для Краба такие измерения систематически не проводились, тем не менее по совокупности данных абсолютных и относительных измерений имеется возможность восстановить поведение его спектра до 1953 года включительно. Рассмотрим вначале распределение энергии по спектру Крабовидной туманности в период 1953 - 1974 гг.

I. Спектр Крабовидной туманности в 1953 - 1974 гг.

Уже при первой систематизации спектров дискретных источников /1/ спектр Крабовидной туманности представлен в виде

Таблица I

№ п/п	α	θ	Поток $S(\nu)$, ян на частоте ν МГц	Диапазон частот	Ссылка
1.	$0,28 \pm 0,05$	3,79	$S(100) = 1700$	30 МГц	1000 МГц /1/
2.	$0,27 \pm 0,02$	3,7928	$S(400) = 1230$	38 МГц	3200 МГц /2/
3.	$0,3 \pm 0,1$			38 МГц	750 МГц /3/
4.	$0,26 \pm 0,2$			750 МГц	5000 МГц /3/
5.	0,26	3,783		38 МГц	5000 МГц /3/
6.	$0,247 \pm 0,015$	$3,7295 \pm 0,0462$		400 МГц	35 ГГц /4/
7.	$0,263 \pm 0,01$	3,783	$S(1000) = 966,12$	100 МГц	20 ГГц /5/
8.	$0,299 \pm 0,009$	$3,915 \pm 0,031$		1 ГГц	35 ГГц /6/
9.	$0,28 \pm 0,05$	3,864		10 МГц	10 ГГц /7/

$$\lg S(\nu) = B - \alpha \lg \nu, \quad (I)$$

где $S(\nu)$ - поток в единицах потока, α - спектральный индекс, B - поток на частоте 1 МГц, ν - частота в мегагерцах.

Значения α и B в более поздних исследованиях несколько отличались от /I/, однако представление спектра Краба в виде (I) сохранилось и в последующих работах.

В табл. I приведены значения α и B из основных работ, содержащих радиоастрономические шкалы потоков, а также из известного обзора /7/.

Из таблицы видно, что величины спектрального индекса разбросаны в довольно широком интервале значений: $0,247 \leq \alpha \leq 0,3$, хотя в каждой из шкал использовались, большей частью, одни и те же экспериментальные данные. Естественно, что подобная ситуация практически исключает возможность исследования эволюции спектра Крабовидной туманности в прошлом. Поэтому, чтобы установить точное распределение энергии радиоизлучения по спектру Краба, нужен новый обобщенный анализ всех имеющихся данных и, прежде всего, радиоастрономических шкал потоков.

В /2-6/ содержатся широко известные абсолютные шкалы потоков. Они построены по одному и тому же принципу. Мощный дискретный источник - обычно Кассиопея А - принимался за первичный эталон интенсивности радиоизлучения в широком диапазоне частот. Спектр первичного эталона строился на основе прямых абсолютных измерений, проводившихся, что необходимо подчеркнуть, разными методами: эталонных диполей, "искусственной Луны" и эталонных рупорных антенн. Каждый из методов характерен для своего частотного интервала, и они мало перекрывают друг друга по частоте.

Система вторичных эталонов или стандартов состоит из нескольких умеренно-сильных источников, имеющих простой неменяющийся во времени спектр. Их спектры определяются в широком диапазоне частот относительно первичного стандарта.

Существование множества шкал является следствием их неудовлетворительной точности. Каждая из последующих шкал должна была устранять недостатки своих предшественников, хотя не имелось существенных отличий ни в исходном экспериментальном материале, ни в методике построения самой шкалы. Сравнению их между собой показывает рас-

хождения, часто превышающие 10%, что заметно больше пределов точности шкал по оценкам их авторов (в том числе для шкал Вн /5/ и /29/, созданных одновременно). Поскольку главной причиной расхождений является различное представление спектра первичного эталона, то необходимы объективные критерии для оценки корректности построения его спектра. Задача была решена с помощью метода относительных спектров

Имея набор относительных измерений, для любой пары источников в возможно более широком диапазоне частот, можно построить зависимость логарифма отношения потоков от логарифма частоты, которая названа относительным спек-

$$\lg \frac{S_{u_1}(\nu)}{S_{u_2}(\nu)} = \lg S_{u_1} - \lg S_{u_2}, \quad (2)$$

где $S_{u_1}(\nu)$ и $S_{u_2}(\nu)$ - потоки первого и второго источников на частоте ν . Относительные измерения для сильных и умеренно-сильных источников выполняются с ошибкой порядка 1%, значительно меньшей, чем в абсолютных измерениях. Поэтому для источников с постоянными во времени потоками относительные спектры могут быть найдены с очень высокой точностью.

В /10/ показано, что, имея относительные спектры для группы источников, можно однозначно определить форму спектра для каждого из них в отдельности, т.е. получить распределение спектральных индексов и точки изломов. Для мощных источников возможны прямые абсолютные измерения, выполненные в достаточном частотном интервале каким-либо одним методом. Тогда, если по данным абсолютных измерений участок спектра может быть получен с высокой точностью, а поведение спектра за пределами этого частотного интервала известно по относительным спектрам, то абсолютный спектр этого источника определяется во всем частотном диапазоне, где найдены относительные спектры. Поскольку абсолютная привязка сделана с помощью абсолютных измерений, выполненных каким-либо одним методом, полученный абсолютный спектр позволяет непосредственно сравнить между собой результаты абсолютных измерений, проведенных разными методами в разных частотных диапазонах.

Для построения абсолютной шкалы в /8-10/ выбрана группа сравнения, состоящая из источников Лебедь А (ЗС 405), Дева А (ЗС 274), Геркулес А (ЗС 346), Гидра А (ЗС 218), ЗС 353 и ЗС 123, имеющих стабильные потоки. Поскольку в процессе наших многолетних абсолютных измерений на Кара-Даге выявлена сложная и значительная переменность Кассиопеи А, то за первичный эталон был принят абсолютный спектр Лебеда А. Абсолютные измерения потоков в диапазоне 0,5 - 4 ГГц для этого источника, окруженного сильным и неоднородным фоном, недостаточно точны из-за малого углового разрешения антенн, применяемых для абсолютных измерений. Поэтому спектр Лебеда А в этом диапазоне был определен путем сравнения интенсивностей Лебеда А и Кассиопеи А на антенных с достаточным угловым разрешением, а спектры Кассиопеи А на те же эпохи получены из абсолютных измерений методом "искусственной Луны" на Кара-Даге. Таким образом, новая абсолютная шкала построена на основе метода абсолютных измерений "искусственной Луны" и метода относительных спектров. Она содержит первичный эталон Лебедь А и 15 вторичных эталонов: это уже перечисленные источники сравнения, а также ЗС 119, 138, 147, 161, 196, 295, 409, 433, DR-21 и NGC 7027. Шкала определена в диапазоне частот $10 \text{ МГц} \leq \nu \leq 31 \text{ ГГц}$. Интересно сравнение абсолютных спектров, полученных в новой шкале, с данными прямых абсолютных измерений, выполненных различными методами. Наблюдается хорошее соответствие данных, полученных методом эталонных диполей и методом "искусственной Луны". Абсолютные измерения, выполненные с помощью эталонных рупорных антенн дают результаты, не совпадающие ни с методом "искусственной Луны", ни с методом эталонных диполей. Кроме того, полученные на их основе спектры не согласуются и с относительными спектрами /10/. Отличие потоков, измеренных методом эталонных рупорных антенн, от значений, соответствующих методу "искусственной Луны", зависит от частоты. На частотах выше 8 ГГц потоки, измеренные с помощью рупорных антенн, на 16-18% больше, чем в шкале /8-10/, ниже 600 МГц они становятся меньше, и разность растет с уменьшением частоты.

Как уже отмечалось, спектры первичного эталона шкал /2-6/ строились с использованием результатов абсолютных измерений, выполнявшихся разными методами: в сантиметровом и миллиметровом диапазонах преобладали данные, полученные с помощью рупорных антенн. Вследствие этого спектральные индексы спектров, построенных на основе со-

вокупности различных абсолютных измерений, существенно занижены. Это замечание в полной мере относится и к спектру Крабовидной туманности, построенному в работе /7/. Шкалы /2-6/ в сантиметровом диапазоне оказались завышенными на 10% и более, как и спектры их первичного эталона.

Таким образом, применение метода относительных спектров позволило выяснить, что для построения точной абсолютной шкалы результаты абсолютных измерений с помощью эталонных рупорных антенн не могут быть использованы. Вторая причина неточности шкал /2-6/ заключается в том, что в них не учитывался сложный характер переменности Кассиопеи А, выявленный в последние годы в результате длительных наблюдений.

В связи со сказанным выше понятен разброс параметров спектра Крабовидной туманности, приведенных в табл. I, и, кроме того, следует, что значения α занижены. Возможно несколько уменьшить разброс, если в шкалах /2-6/ вместо спектра первичного стандарта Кассиопеи А, синтезированного по данным, полученным различными методами и в течение многих лет, воспользоваться "мгновенными" спектрами Кассиопеи А на соответствующую эпоху /37 - 39/. Можно показать, что новые параметры спектра Краба для любой шкалы будут равны:

$$\alpha = \alpha^* + (\Delta\alpha)_{\text{кас}}, \quad (3)$$

$$\beta = \beta^* + (\Delta\beta)_{\text{кас}},$$

где α^* , β^* - параметры спектра Краба из шкалы, $(\Delta\alpha)_{\text{кас}}$, $(\Delta\beta)_{\text{кас}}$ - разности параметров "мгновенного" спектра Кассиопеи А в шкале "искусственная Луна" и параметров спектра, принятых в шкалах /2-6/. Соответствующие результаты приведены в табл.2, из которой видно, что величины спектральных индексов в ревизованных таким образом шкалах увеличились, а их разброс стал значительно меньше: $0,302 \leq \alpha \leq 0,333$.

Эпоха	α	$\lg(S_1)$	Шкала
1961.0	0,330	3,989	/2/ SKL
1964.0	0,322	3,966	/3/ KPW
1964.4	0,331	3,975	/4/ BМW
1965.0	0,302	3,884	/5/ BH
1965.0	0,333	4,00	/6/ BGPW

Большой определенности относительно параметров спектра Краба в прошлом можно достичь, используя оригинальные данные радиоастрономических измерений, опубликованные в литературе, приведя потоки к единой шкале. С этой целью были отобраны практически все работы, выполненные с 1953 по 1974 годы с высокой относительной точностью на антеннах с достаточно высоким разрешением, в которых потоки Крабовидной туманности $S_{\text{КР}}^*(\nu)$ и Лебеда А $S_{\text{Лес}}^*(\nu)$ измерены одновременно в одной и той же шкале, относительно или абсолютно. Пользуясь стандартным спектром Лебеда А $S_{\text{Лес}}(\nu)$ из /8/ и /10/, потоки Крабовидной туманности приводились к нашей шкале согласно соотношению

$$S_{\text{КР}}(\nu) = S_{\text{КР}}^*(\nu) \pi \quad \text{или} \quad S_{\text{КР}}(\nu) = \frac{S_{\text{КР}}^*(\nu)}{S_{\text{Лес}}^*(\nu)} S_{\text{Лес}} \quad (4)$$

где $\pi = \frac{S_{\text{Лес}}(\nu)}{S_{\text{Лес}}^*(\nu)}$ — множитель шкалы, который использовался для работ, где приведена абсолютная величина потока Лебеда А. Соответствующие потоки $S_{\text{КР}}(\nu)$ приведены в табл. 3.

Новый спектр Крабовидной туманности хорошо описывается соотношением (1). Значительные отклонения от среднего распределения имеют две точки: на 81,5 МГц /11/ поток ниже на 15% и на 8 ГГц /26/ поток выше на 8%.

На частоте 81,5 МГц были измерены потоки 30 источников, в том числе двух вторичных стандартов /В - 10/ ЗС 348 и ЗС 353. Если отношения потоков Лебеда А и ЗС 348, а также Лебеда А и ЗС 353, со-

Таблица 3

Эпоха	Частота, МГц	$S_{кр}^{(y)}$ $S_{лес}^{(y)}$	$S_{лес}^{(y)}$ /8/, Ян	n	$S_{кр}^{(y)}$ Ян	Характеристика антенны	Литерату- ра
1961-63	38 0,110455	25909,0	I,178	2861,8	Аперт. синт. $\Delta\theta_{0,5} = 45'$	/ 3/	
1969.5	81,5 0,11865	16217,4	I	1924,2	Интерфер. 60λ	/11/	
1959.1	178 0,17632	9428,9		1662,5	Параболический цилиндр 262 λ x 12 λ	/ 3/	
1953.3	250 0,21053	7413,8	I,951	1560,8	Решетка $\Delta\theta_{0,5} = 1,2 \times 17^\circ$	/12/	
1955.9	400 0,25416	5308,5	I,261	1349,2	25 м антенна $\Delta\theta_{0,5} = 2^\circ$	/13/	
1959.5	440 0,25785	4962,6	I	1279,6	26 м антенна	/14/	
1963.4	612 0,32394	3581,6	I,01	1160,2	76 м антенна	/15/	
1972.3	960 0,448	2242,6	-	1004,7	$\Delta\theta_{0,5} = 36',5 \times 49',4$	/17/	
1964.3	960 0,441	2242,6	-	989,1	$\Delta\theta_{0,5} = 35',5 \times 62',4$	/17/	
1959.5	1200 0,51368	1778,2	-	913,4	26 м антенна	/14/	
1956.7	1390 0,59054	1526,1	0,8	901,2	25 м антенна	/18/	
1959.5	1400 0,58521	1514,8	-	886,5	26 м антенна	/14/	
1962-63	1400 0,58491	1514,8		886 91,5	5 м антенна	/ 3/	
1957	1419 0,59217	1493,7	0,91	884,5	25 м антенна	/19/	
1971.6	1420 0,58224	1492,6	-	869,1	25 м антенна	/ 5/	
1974.4	1646		I	834,4	25 м антенна	/31/	
1971.5	2667 0,97677	720,6	-	703,9	25 м антенна	/ 5/	
1959.1	2930 1,06349	641,9	I,02	682,7	25,5 м антенна	/21/	
1961.1	3000 1,06029	623,5	-	661,1	26 м антенна	/22/	
1964.4	3150 1,08527	587,1	0,91	637,1	$\Delta\theta_{0,5} = 120'$	/23/	
1965.3	4080 1,4937	426,8	0,9	637,4	$\Delta\theta_{0,5} = 45'$	/24/	
1964.4	4995 1,83486	332,5	-	610,1	26 м антенна $\Delta\theta_{0,5} = 10',7$	/ 4/	
1966-67	5000 1,83288	332,1		608,7	42,7 м антенна	/ 3/	
1965.0	6660 2,17736	233,2	0,88	507,8	$\Delta\theta_{0,5} = 60'$	/23/	
1966.2	8000 2,55102	186	-	474,6	8,5 м антенна	/25/	
1964.0	8000 2,865	186	0,93	533	26 м антенна	/26/	
1964.4	14500 4,4843	89,4	-	400,75	26 м антенна	/ 4/	
1966.3	15300 4,83092	83,64	-	404,07	42,7 м антенна	/27/	
1973.3	22285 6,59469	52,59	0,874	346,8	6,1 м антенна	/28/	

ясно /II/, сравнить с относительными спектрами этих источников, найденными в /В - 10/ на основании многих работ, то оказывается, что отличие в обоих случаях составляет 15%. Если потоки /II/ приводятся в шкале /В - 10/ через стандартные спектры ЗС 348 или ЗС 353, а не Лебеда А, то поток Крабовидной туманности на $\gamma = 81,5$ МГц попадает на единый спектр этого источника по данным табл. 2. Таким образом, данные /II/ носят противоречивый характер и не были включены в окончательный анализ.

Работы /26/ и /25/ выполнены на одной частоте - 8 ГГц, во времени их разделяет два года, однако потоки Крабовидной туманности отличаются на 12%. Поток, измеренный в /25/, находится в хорошем соответствии со средним спектром, в то время как по данным /26/ он значительно выше. Результат /26/ мог бы свидетельствовать о наличии у Крабовидной туманности быстрой локальной переменности, имевшей место в период наблюдений. Поток /26/ в дальнейшем не принимался во внимание, поскольку он не характерен для среднего спектра Крабовидной туманности в этот период. По всем остальным точкам табл. 3 методом наименьших квадратов был вычислен спектр Крабовидной туманности в виде (I) с параметрами

$$\alpha = 0,3298 \pm 0,0036; \quad \beta = 3,9804 \pm 0,0119 \quad (5)$$

Все точки брались с одинаковым весом, поскольку погрешность отношения $S_{кр}(\gamma) / S_{Леб}^*(\gamma)$ мала, но не всегда строго оценивается по оригинальным работам. Предполагается, что полная погрешность $S_{кр}(\gamma)$, состоящая из погрешностей отношения $S_{кр}^*(\gamma) / S_{Леб}^*(\gamma)$ и шкалы, не превышает для всех точек $\pm 5\%$.

Кроме ранее оговоренных точек по работам /II/ и /26/, все точки табл. 3 хорошо согласуются с найденной зависимостью. Это можно считать веским аргументом в пользу утверждения, что с 1953 по 1974 годы у Крабовидной туманности не было переменности, превышающей ошибки измерений.

Достаточное количество данных имеется, чтобы восстановить "мгновенный" спектр Краба на эпохи 1964.2-1965.9. В этот период были сделаны (Станкевич К.С.) детальные сравнения интенсивностей радиополучения Краба и Кассиопеи А в диапазоне 513-1840 МГц; потоки

приведены в табл. 4. На эту же эпоху приходится ряд измерений на высоких частотах других авторов, которые уже приводились в табл. 3.

Таблица 4

Эпоха	Частота (МГц)	$S(\nu)$ к(Ян)	Характеристика антенны	Литература
1964.2	513	1172	$\Delta \theta_{0,5} = 70' \times 79'$	Н.Р.
1964.5	535	1193	$\Delta \theta_{0,5} = 67' \times 76'$	Н.Р.
1964.2	556	1159	$\Delta \theta_{0,5} = 65' \times 73'$	Н.Р.
1964.2	740	1032,9	$\Delta \theta_{0,5} = 49' \times 55'$	Н.Р.
1964.2	853	998,5	$\Delta \theta_{0,5} = 42' \times 48'$	Н.Р.
1964.2	960	989,1	$\Delta \theta_{0,5} = 37,5' \times 42,4'$	/17/
1965.2	1100	912.4	$\Delta \theta_{0,5} = 33' \times 37'$	Н.Р.
1965.2	1590	855,7	$\Delta \theta_{0,5} = 23' \times 26'$	Н.Р.
1965.2	1840	813,5	$\Delta \theta_{0,5} = 19,5' \times 22'$	Н.Р.
1964.4	3150	637,1	$\Delta \theta_{0,5} = 120' \times 120'$	/23/
1965.3	4080	637,4	$\Delta \theta_{0,5} = 45' \times 45'$	/24/
1964.4	4995	610.1	$\Delta \theta_{0,5} = 10,75'$	/ 4/
1965.0	6660	507,8	$\Delta \theta_{0,5} = 60' \times 60'$	/23/
1965.9	8250	487,6	$\Delta \theta_{0,5} = 46,5' \times 58,7'$	/40/
1964.4	14500	400,75	$\Delta \theta_{0,5} = 3,34'$	/ 4/

Вычисленные параметры спектра

$$\alpha = 0,3193 \pm 0,0073, \quad \beta = 3,9406 \pm 0,0241 \quad (6)$$

в пределах ошибок согласуются с (5).

Прямые абсолютные измерения спектра Крабовидной туманности в диапазоне $0,5 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 10 \text{ ГГц}$ были проведены авторами осенью 1971 года, а также весной и осенью 1973 г. методом "искусственной Луны" на Кара-Даге. Результаты измерений приведены в табл. 5. Погрешность измерений во всех точках составляет около 2,5%. Спектр найден в виде (1) методом наименьших квадратов и имеет параметры:

$$\alpha = 0,3316 \pm 0,007, \quad \beta = 3,9834 \pm 0,0223 \quad (7)$$

Очевидно, что параметры спектров, рассчитанные по данным табл. 3-5, прекрасно согласуются между собой. Но если измерения в первом случае проводились в течение длительного времени, около 20-и лет, то спектры (6-7) измерены за 2 года и являются практически мгновенными. Совпадение этих спектров также свидетельствует о стабильном характере радионалучения Крабовидной туманности с 1953 по 1974 год.

Таблица 5

Эпоха	ν (МГц)	$S_{кр}(\nu)$ (Ян)	$\pm \Delta S$ %
1973.3	510	1218	2,5
- " -	550	1184	-"
- " -	600	1223	-"
- " -	648	1170	-"
- " -	699	1095	-"
- " -	750	1013	-"
- " -	794	1038	-"
- " -	900	995	-"
- " -	988	995	-"
1973.7	1000	931	-"
1971.8	1200	919	-"
- " -	1498	851	-"
- " -	2000	756	-"
- " -	2250	742	-"
1973.7	2800	679	-"
1971.8	3301	661	-"
1973.7	3597	641	-"
1971.8	3714	613	-"
1973.7	3872	625	-"
- " -	9935	470	-"

Аналогичный вывод сделан в /31/ при непосредственном сравнении относительных и абсолютных экспериментальных данных на длинах волн 31,5 и 3,07 см за двадцатилетний период после 1961 года: изменения в спектре Краба произошли после 1975 г.

2. Радионалучение Краба после 1975 г.

Для исследования эволюции радионалучения Крабовидной туманности осенью 1980 г. и осенью 1981 г. на Кара-Даге были проведены абсолютные измерения на весте длинах волны в диапазоне от 3,07 до 50 см. Абсолютные величины потоков получены методом "искусственной Луны" /33/ и, следовательно, измеренные потоки находятся на одной шкале с данными табл. 3-5 и могут непосредственно сравниваться. Соответствующие результаты приведены в табл. 6.

Таблица 6

Эпоха	ν (МГц)	$S_{кр}(\nu)$ (Ян)	Случайная ошибка измерений $\pm \Delta S(\nu)$ %
1981.7	613	1107	1,6
1981.7	855	998	1,5
1981.4	935	971	1,0
1980.8	2730	687	0,7
1980.8	3630	641	0,7
1980.7	9770	442	1,7

Таблица 7

Эпоха	ν (МГц)	$S_{кр}(\nu)$ (Ян)	Случайная ошибка измерения $\pm \Delta S(\nu)$ %
1984.6	532	1073	0,3
1983.9 и 1984.3	957	920	0,5
1983.9	1500	793	1,0
1984.8	2000	748	1,5
1984.3 и 1984.8	2250	702	1,2
1983.9, 1984.3, 1984.9	2800	673	0,9
1983.9 и 1984.9	3850	605	0,9
1984.7	9770	471	1,5

Таблица 8

Эпоха	γ (МГц)	$S_{кр}(\gamma)$ (Ян)	Случайная ошибка измерения $\pm \Delta S(\gamma)$ %
1985.3	512,5	1110	1,7
1985.3	574,5	1050	0,6
1985.3	703	992	0,5
1985.3	991	896	0,7
1985.3	1500	835	1,0
1985.65	3900	674	0,7
1985.65	4880	601	0,9
1985.65	8108	478	0,9

Таблица 9

Эпоха	γ (МГц)	$S_{кр}(\gamma)$ (Ян)	Случайная ошибка измерения $\pm \Delta S(\gamma)$ %
1986.7	560	1123	0,3
1986.7	614	1072	0,5
1986.65	753	997	0,8
1986.7	795	1004	0,5
1986.7	954	946	0,6
1986.7	2800	692	1,4
1986.7	3390	641	1,1
1986.7	4880	583	0,8
1986.65	8108	507	0,9
1986.65	15000	411	1,0

Параметры спектра Крабовидной туманности на эпоху измерений были

$$\alpha = 0,3275 \pm 0,0074, \quad \beta = 3,9607 \pm 0,0246 \quad (8)$$

В сравнении со спектрами (5-7) потоки в 1980-1981 гг. уменьшились в среднем на 2,8% почти независимо от частоты, светимость в диапазоне 0,5 - 10 ГГц упала на ту же величину $\Delta L / L = 2,7\%$. Отметим, что спектральный индекс до 1981 г. существенно не менялся.

По данным наблюдений покрытий Крабовидной туманности Луной в декабре 1982 г. и в январе 1983 г. спектр туманности в диапазоне 0,75 - 1,65 ГГц на эпоху 1983.0 описывался параметрами.

$$\alpha = 0,333, \quad \beta = 3,9656 \quad (9)$$

В дальнейшем в спектре Крабовидной туманности произошли более значительные изменения. В 1983-1984 гг. на Кара-Даге были измерены её потоки на 8-и частотах диапазона 0,5-10 ГГц также с калибровкой по методу "искусственной Луны"; результаты представлены в табл. 7. Спектр имел следующие параметры:

$$\alpha = 0,2857 \pm 0,0049, \quad \beta = 3,8107 \pm 0,0164 \quad (10)$$

Сравнение спектров (5-8) и (10) показывает, что к 1984 г. произошло сильное уменьшение спектрального индекса на величину $\Delta\alpha = 0,044$ или на 14% от первоначальной величины (5). В диапазоне частот, где производились измерения, светимость оказалась на 3% меньше, чем для спектра (5). Она почти не изменялась после 1981 г., несмотря на возрастание скорости падения потоков на волнах дециметрового диапазона. Компенсация вызвана перераспределением энергии по спектру за счет возрастания потоков на сантиметровых волнах.

Абсолютные измерения, проведенные на измерительном комплексе

Кара-Даг в 1965 и 1986 гг., показывают, что спектр Крабовидной туманности может существенно меняться за время порядка 1 года.

Спектр 1985 г. (табл. 8) содержит измерения в диапазоне 512-8108 МГц. Плотности потоков в диапазоне 512-4880 МГц распределены по степенному закону с параметрами

$$\alpha = 0,2594 \pm 0,008, \quad \beta = 3,7395 \pm 0,0249 \quad (II)$$

Поток Крабовидной туманности, измеренный на частоте 8108 МГц, оказался на 11% ниже степенного закона (II). Необходимо отметить, что измерения одновременно на той же установке потоки Лебеда А и Кассиопеи А находятся в хорошем соответствии со стандартными спектрами этих источников. Следовательно, в 1985 г. спектр Крабовидной туманности имел различные зависимости потока от частоты на частотах ниже и выше $\nu = 4880$ МГц.

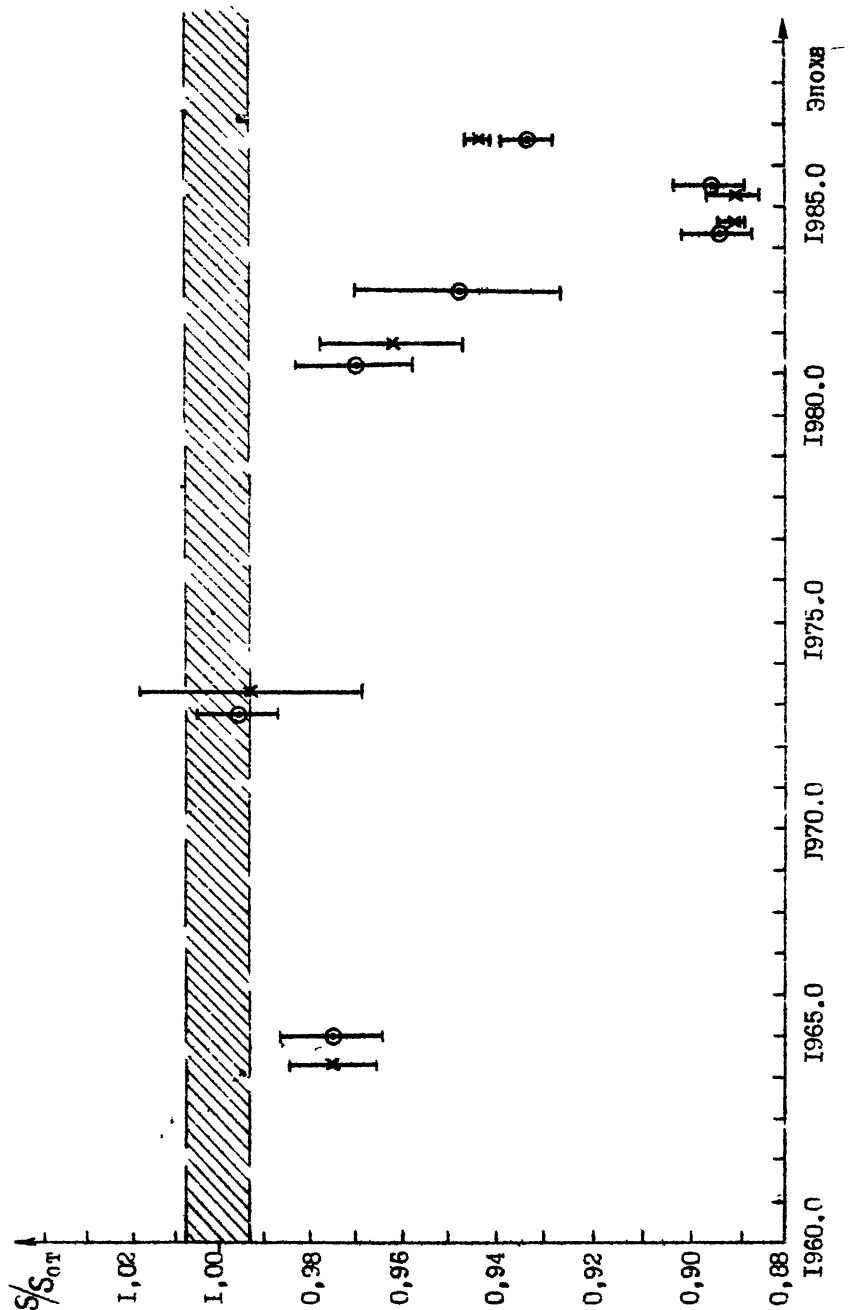
Спектр Крабовидной туманности на эпоху 1966.7 (табл. 9) представлен данными в диапазоне частот 0,55-15 ГГц и не содержит неоднородностей. Параметры этого спектра

$$\alpha = 0,2977 \pm 0,003, \quad \beta = 3,8624 \pm 0,0101 \quad (I2)$$

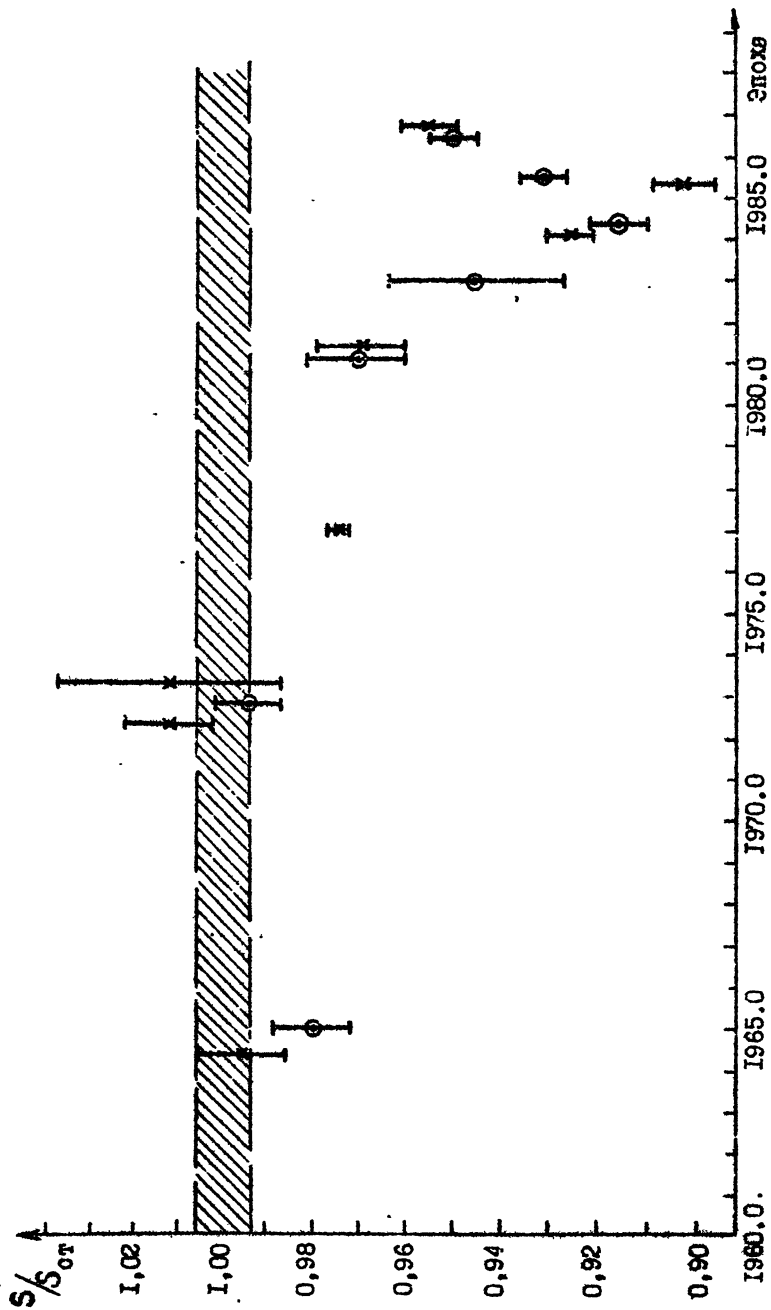
Спектральный индекс по сравнению с 1985 г. вырос за год на величину 0,038 или на 12%. Светимость источника в диапазоне 0,5 - 10 ГГц несколько возросла и лишь на 0,9% меньше, чем для спектра (5).

Для иллюстрации временных изменений потоков на рис. 1-3 приведены графики зависимости $S/S_{ст}$ от времени на частотах 550, 960 и 9770 МГц, где $S_{ст}$ - значения спектра (5). Точки на графиках соответствуют как непосредственно измеренным на этих или близких частотах плотностям потока, так и значениям спектров (6-12) для соответствующих частот и эпох. Затрихованная полоса показывает ошибку определения потока по спектру (5).

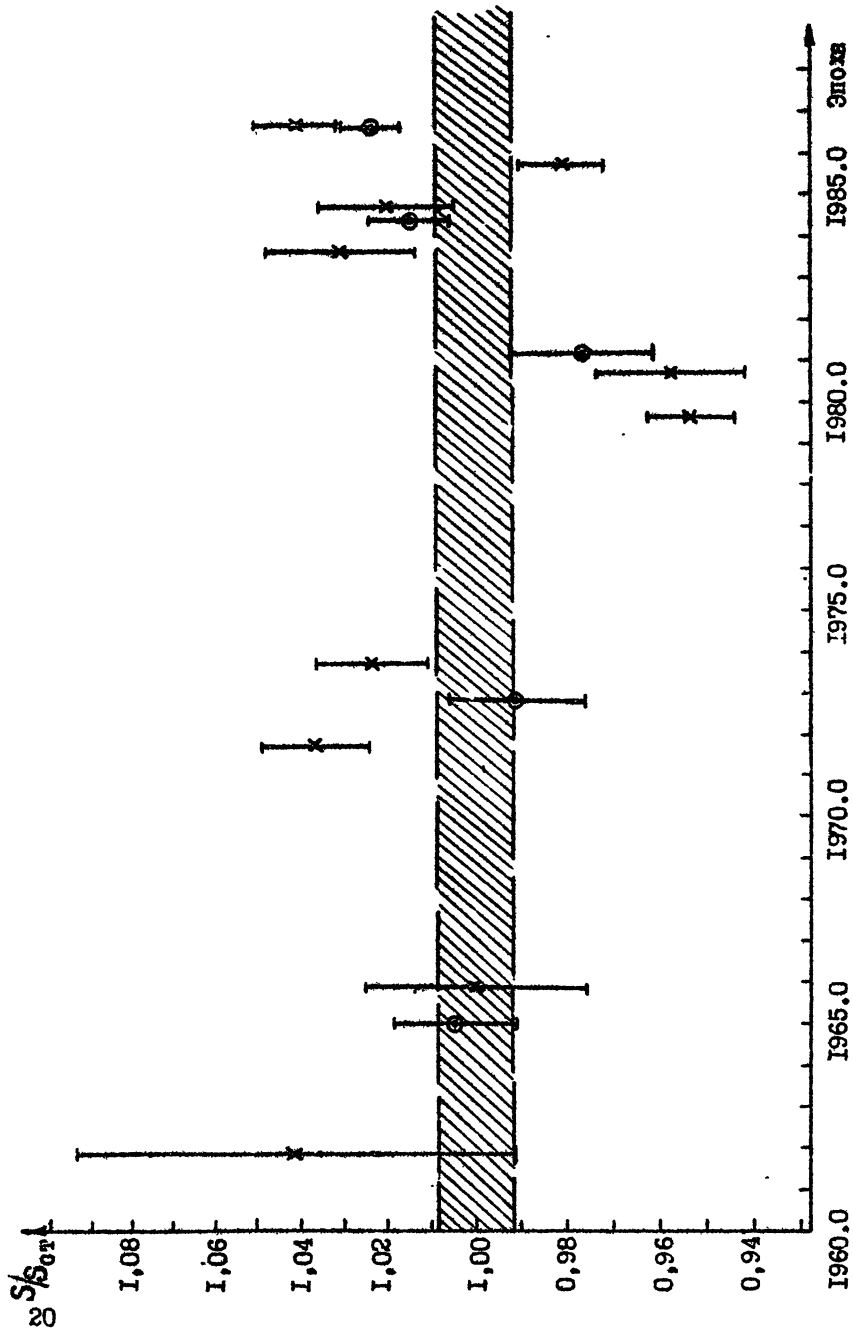
В дециметровом диапазоне на частотах 550 и 960 МГц (рис. 1 и 2) относительные изменения потока подобны по времени, но с уменьшением частоты растут: При всех изменениях поток на обеих частотах не



Р и с. 1. Изменение потока на частоте 550 МГц относительно стандартного спектра (5) в зависимости от эпохи; x - по непосредственным измерениям, o - по мгновенным спектрам



Р и с. 2. Изменение потока на частоте 550 МГц относительно стандартного спектра (5) в зависимости от эпохи; обозначения те же, что на рис. 1.



Р и с. 3. Изменение потока на частоте 9770 МГц относительно стандартного спектра (5) в зависимости от эпохи; обозначения те же, что на рис. 1

превышал за период наблюдений начального уровня (5). Минимальные значения потока наблюдались в 1983-1985 гг. и достигли 89 и 92% на частотах 550 и 960 МГц, после чего в 1986 г. поток вновь заметно вырос.

В сантиметровом диапазоне (рис. 3) видны отклонения от начального уровня (5) как в меньшую так и в большую стороны, но те и другие редко превышают 5%. В большинстве случаев непосредственно измеренные плотности потоков в пределах ошибок совпадают с соответствующими значениями спектров (6-12).

Сравнение экспериментальных результатов в диапазоне дециметровых-сантиметровых волн позволяет отметить характерную особенность переменности радиоизлучения Крабовидной туманности в период 1976 - - 86 гг.: наличие быстрых и значительных изменений спектра, не сопровождающихся большими изменениями интегральной светимости источника.

В целом из результатов проведенных экспериментов следует, что наблюдаемый процесс изменения интенсивности и спектра Крабовидной туманности начался после 1974-75 гг. и развивался нерегулярно во во времени. Поэтому он не может являться следствием адиабатических потерь при расширении туманности.

В последние годы ряд работ был выполнен по исследованию радиоизлучения за пределами туманности с целью поиска гало, содержащего рассеянную массу ($\sim 10 M_{\odot}$), выброшенную при взрыве сверхновой. В 1975-76 гг. поиск слабого гало сделан на частоте 610 МГц в области с радиусом $1,5^{\circ}$ от центра, совпадающего с пульсаром, и не обнаружено никакого заметного радиоизлучения на уровне, большем 0,1% от радиояркости Краба в центре /36/. На волне 21 см в сентябре 1982 г. не обнаружено радиоизлучение выше 30 дБ от интенсивности Краба на расстоянии 8 - 32 от центра /35/.

С другой стороны, отсутствие плеча в радиояркости показывает, что не было выхода релятивистских частиц за пределы туманности в современную эпоху. Поэтому падение потока и изменение спектра источника не могли произойти из-за ухода излучающих частиц наружу. Эволюция остатков сверхновых, содержащих пульсар, (или крабоподобных, или плерионов) исследовалась теоретически в ряде работ. В /16/ показано, что в современную эпоху радиоизлучения туманности должно убывать равномерно по частоте на 0,26% в год. Если изменения спектрального индекса в радиодиапазоне возможны, то только на ранних стадиях эволюции, при возрасте порядка 100 лет, т.е.

существенно меньше, чем у Краба /20/.

В связи с этим представляет интерес следующий факт. В работах /42,34/ сообщалось, что поток точечного источника в Крабе на частоте $\nu = 74$ МГц за время с 1971 по 1975 гг. уменьшился на 45% и затем стабилизировался на нижнем уровне.

Можно предположить, что в Крабовидной туманности действует механизм непрерывного обмена релятивистскими частицами между туманностью и областью их генерации - пульсаром. Поведение спектра туманности в этом случае отражает баланс между потерями энергии релятивистскими частицами во время взаимодействия их с активными областями вокруг пульсара и инжекцией.

В /41/ опубликованы результаты измерений плотностей потоков Крабовидной туманности на эпоху 1981 г. в далеком ИК диапазоне и сделан обзор данных в оптике и ультрафиолете. В целом спектр синхротронного излучения Краба на эпоху 1981 г. (кроме декаметрового диапазона) хорошо аппроксимируется двумя спектральными индексами $\alpha_r = 0,330$ и $\alpha_0 = 0,8$ с точкой перелома на частоте $\nu_B = 1 \cdot 10^{13}$ Гц. Изменение спектра Краба обнаружено нами при сравнении непосредственных экспериментальных данных в диапазоне 0,5 - 10 ГГц. Весьма вероятно, что эволюция спектра в других участках может быть иной.

Дата поступления статьи
16 марта 1987 г.

Литература

1. Whilfield G.R. - Mon.Not.R.Astr.Soc., 1957, v.117, N 6, p.680-691.
2. Conway G.R., Kellermann K.I., Long R.J. - Mon.Not.R.Astr.Soc., 1963, v.125, N 3-4, p.261-284.
3. Kellermann K.I., Pauliny-Toth I.I.K. and Williams P.J.S. - Astrophys.J., 1969, v.157, N 1, p.1-34.
4. Baars J.W.M., Mezger P.G. and Wendker H. - Astrophys.J., 1965, v.142, N 1, p.122-124.
5. Baars J.W.M. and Hartsuijker A.P. - Astron.Astrophys., 1972, v.17, N 2, p.172-181.
6. Baars J.W.M., Genzel R., Pauliny-Toth I.I.K. and Witzel A. - Astron.Astrophys., 1977, v.61, N 1, p.99-106.
7. Apparao K.M.V. - Astrophys.and Space Sci., 1973, v.25, N 1, p. 3-116.
8. Иванов В.П.-Тезисы докладов XIV Всесоюзной радиоастрономической конференции по аппаратуре, антеннам и методам. Ереван,1982, с.392-393.
9. Иванов В.П.-Тезисы докладов XIV Всесоюзной радиоастрономической конференции по аппаратуре, антеннам и методам. Ереван,1982, с.392-397.
10. Иванов В.П., Станкевич К.С.а) Препринт №183 НИРФИ, Горький, 1984. б) Известия ВУЗов - Радиофизика,1986,т.29,№1,с.3-27.
11. Scott P.F., Shakeshaft J.R. - Mon.Not.R.Astr.Soc., 1971; v.154, N 4, p.19p-23p.
12. Kraus J.D., Ko H.C. and Matt S. - Astron.J., 1954, v.59, N 11, p.439-443.
13. Seeger C.L., Westerhout G., van de Hulst H.C. - Bull. Astron.Inst.Netherl., 1956, v.13, N 472, p.89-99.

14. Heeschen D.S. - *Astrophys.J.*, 1961, v.133, N1, p.322-334.
15. Conway R.G., Daintree E.L., Long R.J. - *Mon.Not.R.Astron. Soc.*, 1965, v.131, N 2, p.159-171.
16. Reynolds S.P., Chevalier R.A. - *Astrophys.J.*, 1984, v.278, N 2, pt.1, p.630.
17. Станкевич К.С., Иванов В.П., Торхов В.А. - *Астрон.журн.*, 1973, т.50, №3, с.645-646.
18. Westerhout G. - *Bull.Astron.Inst.Netherl.*, 1958, v.14, N 488, p.215-263.
19. Mezger P.G. - *Z.Astrophys.*, 1958, v.46, N4, p.234-244.
20. Bandiera R., Paciny F., Salvati M. - *Astrophys.J.*, 1984, v.285, N1, pt.1, p.134-140.
21. Slcanaker R.M. and Nichols J.H. - *Astron.J.*, 1960, v.65, N 3, p.109-116.
22. Heeschen D.S. and Meredith B.I. - *Publications of the NRAO*, 1961, v.1, N 8, p.121-128.
23. Medd W.J. - *Astrophys.J.*, 1972, v.171, N 1, p.41-50.
24. Wilson R.W., Penzias A.A. - *Astrophys.J.*, 1966, v.146, N 1, p.286-287.
25. Haroules G.G., Brown W.E. - *Astrophys.J.*, 1967, v.149, N 3, p.711-713.
26. Dent W.A., Haddock F.T. - *Astrophys.J.*, 1966, v.144, N 2, p.568-586.
27. Mezger P.G., Schraml J. - *Astron.J.*, 1966, v.71, N9, p.864.
28. Janssen M.A., Golden D.M., and Welch W.J. - *Astron.Astrophys.*, 1974, v.33, N 3, p.373-377.
29. Willis Beverly J. - *Astrophys.J.*, 1973, v.180, N2, p.335-350.
30. Виняйкин В.Н., Разин В.А., - *Астрон.ж.*, 1979, т.56, №5, с.913-917
31. Иванов В.П., Барабанов А.П., Станкевич К.С., Столяров С.П., - *Астрон.ж.*, 1982, т.59, с.963.

32. Иванов В.П., Бубукин И.Т., Станкевич К.С. - Письма в *А.Ж.*, 1982, т.8, №2, с.83.
33. Станкевич К.С., Иванов В.П., Пелюшенко С.А., Торхов В.А., Иванникова А.Н. - Известия ВУЗов - Радиофизика, 1973, т.16, №5, с.786-798.
34. Rickett B.J., Seiradakis J.H. - *Astrophys.J.*, 1982, v. 256, N 2, p. 612.
35. Матвеевко Л.И. - Письма в *А.Ж.*, 1984, т.10, №2, с.III.
36. Wilson A.S., Weiler K.W. - *Nature*, 1982, v.300, p. 155.
37. Барабанов А.П., Иванов В.П., Станкевич К.С., Столяров С.П. - Препринт №207, НИРФИ, Горький, 1986.
38. Барабанов А.П., Иванов В.П., Станкевич К.С., Столяров С.П. - *Астрон.ж.*, 1986, т.63, №5, с.986-938.
39. Иванов В.П., Станкевич К.С. - Препринт №218, НИРФИ, Горький, 1986.
40. Allen R.J., Barrett A.H. - *Astrophys.J.*, 1967, v. 149, N 1, pt. 1, p. 1 - 13.
41. Marsden P.L., Gillett F.C., Lennings R.E., Emerson J.R., de Long P., Olson F.M. - *Astrophys.J.*, 1984, v.278, p. L29.
42. Armstrong J.W., Coles W.A. - *Astrophys.J.*, 1978, v. 220, N 1, p. 346.

Алексей Петрович Барабанов
Валерий Павлович Иванов
Клемент Станиславович Станкевич
Станислав Павлович Столяров

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ**

Подписано в печать 10.07.87 г. МЦ 00329. Формат 60x84/16
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 1,55 п.л. Заказ 4578
Тираж 120. Бесплатно

Отпечатано на ротационной НРФИ