

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 № 218

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ  
СПЕКТРА ОСТАТКА СВЕРХНОВОЙ КАССИОПЕЯ-А. П.

В. П. Иванов

К. С. Станкевич

Горький 1986

## 1. МГНОВЕННЫЕ СПЕКТРЫ КАССИОПЕЙ-А НА ЭПОХИ ПОСЛЕ 1953 ГОДА

Исследование эволюции спектра радиоизлучения остатка сверхновой Кассиопей-А показало, что наряду с вековыми изменениями спектра существуют значительные вариации величин спектральных индексов и потоков, включая их рост в отдельные эпохи /1/. Воссоздать полную картину эволюции оказалось возможным, привлекая данные опубликованных относительных и абсолютных измерений, начиная с 1953 года, предварительные результаты сообщались в /4/.

С этой целью были отобраны работы, содержащие измерения потоков Кассиопей-А с точной временной привязкой. Их данные были приведены к новой абсолютной шкале потоков /2/. Поскольку эта шкала основана на абсолютной калибровке по "искусственной Луне", данные измерений с применением этого метода брались без поправок. Однако основная часть отобранных данных содержит или позволяет получить отношения потока Кассиопей-А,  $S_K(\nu)$ , к потоку хотя бы одного из трех мощных эталонных источников: Лебедя-А,  $S_L(\nu)$ , Девы-А,  $S_D(\nu)$ , и Тельца-А,  $S_T(\nu)$ .

Спектры Лебедя-А и Девы-А - эталонов новой шкалы интенсивностей в диапазоне  $10 \text{ МГц} \leq \nu \leq 31 \text{ МГц}$  - представлены в /2/.

В /3/ показано, что спектр Крабовидной туманности не менялся с 1953 по 1975 гг., что позволяет использовать его для этих эпох как эталонный. Этот спектр определен в новой шкале потоков в диапазоне частот  $38 \text{ МГц} \leq \nu \leq 22285 \text{ МГц}$ , с параметрами  $\alpha = 0,3298$ ,  $\beta = 3,9804$ .

Зная отношения потоков Кассиопей-А и эталонных источников Лебедь-А, Дева-А, Телец-А, можно найти поток Кассиопей-А на эпоху измерений в новой шкале /2/:

$$S_K(\nu) = \frac{S_K^*(\nu)}{S_3^*(\nu)} S_3(\nu), \quad (1)$$

где  $S^*(\nu)$  - потоки источников по данным оригинальной работы,  $S_3(\nu)$  - поток соответствующего эталонного источника в шкале /2/.

Отношения потоков Лебедя-А и Крабовидной туманности к потоку Девы-А, полученные в новой шкале потоков, приняты стандартными. Однако в некоторых работах измеренные отношения потоков меньше стандартных, относительное отклонение величин в обоих случаях превышает случайную ошибку и достигает большего значения для Лебедя-А. Это указывает на нелинейность приемников, применявшихся для измерений.

Поток  $S^*(\nu)$ , измеренный с помощью такого приемника, является функцией истинного потока:  $S^*(\nu) = \varphi [S(\nu)]$ . Как правило, эта зависимость близко аппроксимируется полиномом второй степени

$$S^*(\nu) = a S^2(\nu) + b S(\nu) + c. \quad (2)$$

Если известны значения  $S^*(\nu)$  для трех стандартных источников, то можно составить систему трех уравнений (2), линейных относительно неизвестных параметров  $a$ ,  $b$  и  $c$ .

Решение системы дает

$$\begin{aligned} a = & \left\{ S_3^*(\nu) [S_1(\nu) - S_2(\nu)] + S_2^*(\nu) [S_3(\nu) - S_1(\nu)] + \right. \\ & \left. + S_1^*(\nu) [S_2(\nu) - S_3(\nu)] \right\} / \left\{ S_1(\nu) S_2(\nu) [S_1(\nu) - S_2(\nu)] + \right. \\ & \left. + S_1(\nu) S_3(\nu) [S_3(\nu) - S_1(\nu)] + S_2(\nu) S_3(\nu) [S_2(\nu) - S_3(\nu)] \right\}, \\ b = & \left\{ S_1^2(\nu) [S_2^*(\nu) - S_3^*(\nu)] + S_3^2(\nu) [S_1^*(\nu) - S_2^*(\nu)] + \right. \\ & \left. + S_2^2(\nu) [S_3^*(\nu) - S_1^*(\nu)] \right\} / \left\{ S_1(\nu) S_2(\nu) [S_1(\nu) - S_2(\nu)] + \right. \\ & \left. + S_1(\nu) S_3(\nu) [S_3(\nu) - S_1(\nu)] + S_2(\nu) S_3(\nu) [S_2(\nu) - S_3(\nu)] \right\}, \\ c = & \left\{ S_1(\nu) S_2(\nu) S_3^*(\nu) [S_1(\nu) - S_2(\nu)] + S_1(\nu) S_2^*(\nu) S_3(\nu) [S_3(\nu) - S_1(\nu)] + \right. \\ & \left. + S_1^*(\nu) S_2(\nu) S_3(\nu) [S_2(\nu) - S_3(\nu)] \right\} / \left\{ S_1(\nu) S_2(\nu) [S_1(\nu) - S_2(\nu)] + \right. \\ & \left. + S_1(\nu) S_3(\nu) [S_3(\nu) - S_1(\nu)] + S_2(\nu) S_3(\nu) [S_2(\nu) - S_3(\nu)] \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Исправленное на нелинейность значение потока Кассиопей-А можно найти из выражения

$$S_K(\nu) = -\frac{b}{2a} - \sqrt{\frac{b^2}{4a^2} - \frac{c - S_K^*(\nu)}{a}}. \quad (4)$$

Работы /16, 15/ выполнены с малыми случайными ошибками, однако отклонения потоков Лебедя-А, Тельца-А и Девы-А по их данным указывают на нелинейность приемников. Поэтому потоки Кассиопеи-А на частоте  $\nu = 400$  МГц /15/, а также для  $\nu = 1420$  МГц на эпохи 1968.2 и 1970.5 /16/ находились согласно (4). Во всех других случаях применялось выражение (1).

В результате получен набор данных, включающий около 100 значений потока Кассиопеи-А, распределенных в интервале времени от 1953 до 1982 гг., в диапазоне частот 22-70000 МГц. Измерения на более низких частотах, лежащих в области низкочастотного завала спектра, были опущены из рассмотрения.

Эти данные представлены в табл. I; в третьей колонке дан средний поток Кассиопеи А ( $S_K(\nu)$ ), определяемый по нескольким эталонным источникам согласно (3) и (4), в четвертой колонке перечислены эталонные источники, относительно которых определен поток  $S(\nu)$ , где Л означает Лебедь-А, Д - Дева-А и Т - Телец-А; в пятой колонке приведены характеристики антенн радиотелескопов, с которыми проводились измерения.

Т а б л и ц а I

Эпоха	Частота $\nu$ , МГц	Поток $S(\nu)$ , ян	Эталон. источн.	Характеристика антенны	Лит-ра
1	2	3	4	5	6
1953.6	22.6	63140.0	Л	Интерферометр 20 $\lambda$	/6/
1953.5	81.5	26500.0	Л	Интерферометр 30 $\lambda$	/7/
1953.3	250	11070.0	Л,Т	Решетка $\Delta\theta$ 0.5 $\theta$ = 1,2x17°	/8/
1953.9	3200	1266.6	Л,Д,Т	15-метровая	/9/
1955.85	400	7025.4	Л,Д,Т	25-метровая	/10/
1956.9	81.5	24180.0	Л	Интерферометр 100 $\lambda$	/11/
1956.7	1390	2472.0	Л,Д,Т	25-метровая	/12/
1957	38	43700.0	Л	Интерферометр 60 $\lambda$	/13/
1957	159	16500	*)	Интерферометр 308x 27 $\lambda$	/14/
1957.3	400	7448.0	Л,Д,Т	25-метровая	/15/
1957	1419	2442.4	Л,Д,Т	25-метровая	/16/
1959.5	22.2	58400.0	Л	Интерферометр D=305м	/17/
1959.5	22.6	60600.0	Л	"-	/17/
1959.4	26	53840	Л	"-	/17/
1959.4	26.15	56400.0	Л	"-	/17/

I	2	3	4	5	6
1959.2	178	13070.0	Л,Д,Т	Интерферометр 465λ	/18/
1959.5	440	6305.0	Л,Д,Т	26-метровая	/19/
1959.5	1200	2709.0	Л,Д,Т	26-метровая	/19/
1959.5	1400	2422.0	Л,Д,Т	26-метровая	/19/
1959.1	2930	1264.0	Л,Д,Т	25-метровая	/20/
1959.5	8000	580.0	Л,Д,Т	26-метровая	/19/
1960.0	81.5	22721	Л	Интерферометр 100λ	/45/
1960.5	1400	2410.0	Л	26-метровая	/21/
1960.2	3125	1290.0	Л,Д,Т	22-метровая	/22/
1961.6	24	50284.0	Л	Интерферометр	/23/
1961.6	30	44366.0	Л	"	/23/
1961.6	35	38310.0	Л	"	/23/
1961.6	40	35820.0	Л	"	/23/
1961.6	240	9561.0	Д	76-метровая	/24/
1961.6	412	6064.0	Д	76-метровая	/24/
1961.2	750	3984.0	Л,Д	26-метровая	/25/
1961.1	3000	1299.0	Л,Д,Т	26-метровая	/25/
1961.9	9375	507.0	аб	4-метровая	/26/
1962.7	320	8295.4	Л	Интерферометр	/27/
1962.8	562	4960.0	аб	8-метровая	/28/
1962.9	707.5	4170.0	аб	8-метровая	/28/
1962.8	860	3363.0	аб	8-метровая	/28/
1962.8	927	3295.0	аб	8-метровая	/29/
1962.7	3175	1150.4	Л,Д,Т	15-метровая	/9/
1962.9	9375	501.5	аб	4-метровая	/30/
1963.45	612	4473.5	Л,Д,Т	76-метровая	/31/
1963.15	1400	2365.2	Л,Д,Т	76-метровая	/31/
1963.9	9375	490	аб	4-метровая	/32/
1964.2	535	5280.0	Т	$\Delta \theta_{0.5P} = 67' \times 76'$	/33/
1964.2	556	5048.0	Л	$\Delta \theta_{0.5P} = 65' \times 73'$	/34/
1964.2	740	3973.0	Л	$\Delta \theta_{0.5P} = 49' \times 55'$	/34/
1964.2	960	3110.4	Л	$\Delta \theta_{0.5P} = 35' \times 42'$	/34/
1964.4	3150	1182.0	Л,Т	$\Delta \theta_{0.5P} = 120'$	/35/
1964.4	4995	801.0	Л,Д,Т	26-метровая	/36/
1964.0	8000	545.0	Л,Д,Т	27-метровая	/37/
1964.4	14500	262.5	Л,Д,Т	26-метровая	/36/

I	2	3	4	5	6
1965.0	22.25	54645	Л	Т-образный телескоп $\Delta\theta_{0.5P} = 1^{\circ}, 1' \times 1^{\circ}, 7'$	/38/
1965.2	1100	2895.0	Л,Т	$\Delta\theta_{0.5P} = 33' \times 37'$	/3 /
1965.2	1840	1820.6	Т	$\Delta\theta_{0.5P} = 19,5' \times 22'$	/3 /
1965.2	1590	2050	Т	$\Delta\theta_{0.5P} = 23' \times 26'$	/3 /
1965.3	4080	952.5	Л,Д,Т	$\Delta\theta_{0.5P} = 45'$	/40/
1965.7	4995	773.0	Л,Д,Т	$\Delta\theta_{0.5P} = 6,6' \times 9,8'$	/41/
1965.0	6660	612.0	Л,Т	$\Delta\theta_{0.5P} = 60'$	/35/
1965.9	8250	530.0	Т	$\Delta\theta_{0.5P} = 46,5' \times 56,7'$	/42/
1966.9	38	36200.0	Л	Интерферометр	/43/
1966.9	81.5	21100.0	Л	Интерферометр	/43/
1966.5	152	12800.0	Л	Интерферометр	/43/
1966.7	516	4968	аб	12-метровая	
1966.7	532	4811.5	аб	12-метровая	
1966.7	552	5247	аб	12-метровая	
1966.7	609	4996,5	аб	12-метровая	
1966.7	690	4165	аб	12-метровая	
1966.7	755	4070	аб	12-метровая	
1966.7	825	3684	аб	12-метровая	
1966.7	879	3715	аб	12-метровая	
1966.7	937	3209	аб	12-метровая	
1966.7	994.0	2842.5	аб	12-метровая	
1966.25	8000	536.3	Л,Т	9-метровая	
1966.3	15300	332.0	Л,Д,Т	45-метровая	/44/
1966.0	15500	322	Т	$\Delta\theta_{0.5P} = 30,6' \times 35,0'$	/42/
1967.9	81.5	20920.0	Л	Интерферометр 60	/45/
1968.3	81.5	20110.0	Л	"-	/45/
1968.2	1420	2278.0	Л,Д,Т	25-метровая	/16/
1968.7	8550	516.4	Л,Т	22-метровая	/46/
1968.1	70000	98.0	Т	11-метровая	/47/
1969.4	81.5	20174.0	Л	Интерферометр 60 $\lambda$ $15^{\circ} \times 1^{\circ}$	/45/
1970.5	1420	2231.0	Л,Д,Т	25-метровая	/16/
1970.6	16043	301.0	Т	6-метровая рупорно- параболическая	/48/
1971.6	1420	2172.0	Л,Д,Т	25-метровая	/16/
1971.5	2667	1306.5	Л,Д,Т	25-метровая	/16/

1	2	3	4	5	6
1972.8	402.5	6029.0	Л,Д	Интерферометр 54λ	/49/
1972.3	960	2953	Л,Т	$\Delta\theta_{0.5P} = 36' \times 43'$	/50/
1973.5	22285	239.0	Л,Д,Т	6-метровая	/51/
1974.2	26.3	42082.0	Л		/52/
1974.0	80	18885.0	Л		/52/
1974.0	114	15205.0	Л		/52/
1974.0	121.5	14176.0	Л		/52/
1974.0	144	12697.0	Л		/52/
1974.0	184	10869.0	Л		/52/
1974.0	236	8882.0	Л		/52/
1976.0	151	11858.0	Л		/53/
1976.0	1420	2075.0	Л		/53/
1980.9	151.5	11940.0	Л	Интерферометр	/54/
1981.6	151.5	11164.0	Л	"-"	/54/
1982.75	151.5	11375	Л	"-"	/54/
1981.35	960	2861.0	Л,Д	$\Delta\theta_{0.5P} = 36' \times 43'$	/55/

\* ) Поток на частоте 159 МГц /14/ найден по вторичным эталонам новой шкалы.

Данные из табл.1 отличающиеся по времени измерений не более чем на год, были объединены в группы. По каждой группе точек был построен "мгновенный" спектр Кассиопеи-А, приведенный по времени к средней эпохе измерений. Всего удалось восстановить 14 спектров, распределенных по времени с интервалом в 1-2 года от 1953 до 1972 гг.

Полученные спектры в ряде случаев перекрывают широкий диапазон частот, что позволяет определить вид полного "мгновенного" спектра Кассиопеи-А.

Экспериментальные точки, образующие "мгновенный" спектр, в большей части диапазона следуют степенной зависимости от частоты. Однако часть точек заметно отклоняется от этой закономерности. Можно выделить два типичных случая отклонений точек от зависимости.

а) Отклонения этого типа наблюдаются в низкочастотной части спектра и показывают, что в спектре Кассиопеи-А в метровом диапазоне имеется излом. Характерная форма спектра видна на примере данных 1973-1974 гг.

Спектр в диапазоне 0,5+10 ГГц на среднюю эпоху 1973.6 был измерен методом "искусственной Луны". Его параметры  $\alpha = 0,8088$  и  $\beta = 5,8929$  приведены в /1/.

Измерения на семи частотах в диапазоне 26,3 МГц  $\leq \nu \leq$  236 МГц, выполненные в эпоху 1974.0 /52/, дали параметры спектра:  $\alpha = 0,7025$ ;  $\beta = 5,62$  (без учета потока на  $\nu = 38$  МГц). Следовательно, полный спектр состоит из двух участков разной крутизны, пересекающихся на частоте  $\nu_n = 370$  МГц.

Аналогичная картина наблюдается и в другие годы. В спектрах 1957, 1959, 1961 и 1966 гг. также можно определить параметры обоих участков по данным, имеющимся в табл. I. В ряде случаев на наличие низкочастотного участка указывает лишь одна точка, расположенная существенно ниже по потоку продолжения высокочастотного спектра в область метровых волн.

Таким образом, наличие излома в спектре Кассиопеи-А метрового диапазона, отмеченного в /5/, можно считать установленным. В дальнейшем изложении будем называть участок спектра для частот  $\nu \geq \nu_n$  - ВЧ спектром, а участок  $\nu \leq \nu_n$  - НЧ спектром.

Если спектр состоит из двух прямых участков разной крутизны, то частоту излома можно найти из выражения

$$\lg \nu_n = \frac{\beta_1 - \beta_2}{\alpha_1 - \alpha_2}, \quad (5)$$

где  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  - параметры  $i$ -го участка спектра,  $i = 1, 2$ .

В приведенных примерах  $\nu_n$  принимает значения в широком частотном интервале 80 МГц  $\leq \nu \leq$  370 МГц. Учитывая это, при отсутствии данных для определения  $\nu_n$  все частоты  $\nu \geq 320$  МГц были отнесены к ВЧ спектрам. Небольшое превышение частотой  $\nu_n$  этого значения допустимо. Так, для 1973 г. поток S (320) лежит ниже продолжения ВЧ спектра лишь на 1,5%.

ВЧ спектр 1960 г. можно определить по диапазону  $\nu \geq 320$  МГц. Однако поток на частоте 81,5 МГц /45/ лежит на продолжении этого спектра, определяя его низкочастотную границу.

НЧ спектр 1953 г. определяется по измерениям на частотах 22,6 МГц /6/ и 81,5 МГц /7/. Поток на  $\nu = 250$  МГц оказывается существенно ниже продолжения этого спектра, что позволяет отнести его к ВЧ спектру.

б) В некоторых случаях интенсивность в ограниченном частотном интервале значительно превышает уровень, определяемый основ-



ной частью спектра.

В 1966 г. диапазон частот 0,5–1 ГГц был подробно исследован с помощью абсолютных измерений методом "искусственной Луны" (К.С.Станкевич). Полученный спектр имеет плавный спад интенсивности на обоих краях диапазона. Потоки, измеренные на крайних частотах этого спектра, оказались на 11% ниже его среднего уровня.

В то же время имелись данные на других частотах позволяют построить на ту же эпоху спектр в диапазоне 81,5 МГц  $\leq \nu \leq$  15,5 ГГц. Потоки, измеренные на краях диапазона 0,5–1 ГГц, совпадают с этим спектром.

Таким образом, в спектре 1966 г. на частотах 0,5–1 ГГц имеется избыток потока относительно невозмущенного уровня, определяемого по более широкому диапазону частот.

Аналогичная ситуация наблюдается на частотах 3–4 ГГц в спектре 1973 г. /1/, где превышение потока над невозмущенным спектром составило 10+15%.

Параметры ВЧ спектров находились без учета групп точек, образующих возмущения в спектре с отклонением более 10%.

В итоге были восстановлены "мгновенные" ВЧ спектры 1953, 1956–1966 гг., а также 1968, 1970 и 1972 гг. Эти спектры существенно продолжили к ранним эпохам и дополнили картину эволюции источника, полученную ранее по данным абсолютных измерений. Полученные методом наименьших квадратов значения  $\alpha$  и  $\beta$  для вновь построенных спектров представлены в табл. 2. Ошибки  $\alpha$  и  $\beta$  приведены, если спектр содержит не менее трех точек.

Т а б л и ц а 2

Эпоха	$\alpha$	$\beta$	Частоты, МГц
1953, 5 $\pm$ 0,4	0,85	6,08	250, 3200
1956, 3 $\pm$ 0,4	0,8386	6,0287	400, 1390
1957, 5 $\pm$ 0,5	0,8805	6,1631	400, 1419
1959, 2 $\pm$ 0,3	0,8242 $\pm$ 0,0066	5,9727 $\pm$ 0,0205	178, 440, 1200 1400, 2930, 8000
1960, 3 $\pm$ 0,3	0,7874 $\pm$ 0,0013	5,86106 $\pm$ 0,0039	81,5, 1400, 3125
1961, 5 $\pm$ 0,4	0,7975 $\pm$ 0,0089	5,8798 $\pm$ 0,0279	240, 412, 750, 3000, 9375
1962, 7 $\pm$ 0,2	0,8290 $\pm$ 0,0122	5,9781 $\pm$ 0,0378	320, 562, 707,5, 860, 927, 3175, 9375

Эпоха	$\alpha$	$\beta$	Частоты, МГц
1963,5 $\pm$ 0,4	0,8134 $\pm$ 0,0133	5,9238 $\pm$ 0,0446	612, 1400, 9375
1964,5 $\pm$ 0,5	0,8405 $\pm$ 0,0053	6,00975 $\pm$ 0,0175	535, 556, 740, 960, 3150, 4995, 6660, 8000
1965,5 $\pm$ 0,5	0,8309 $\pm$ 0,0107	5,9757 $\pm$ 0,0388	1100, 1590, 1840, 4080, 4995, 6660, 8250, 15500
1966,5 $\pm$ 0,5	0,7972 $\pm$ 0,003	5,8496 $\pm$ 0,0100	81,5, 152, 516, 532, 994,5, 8000, 15300, 15500
1968,4 $\pm$ 0,3	0,8266	5,9332	1420, 8550
1970,6 $\pm$ 0,2	0,8261	5,9528	1420, 16043
1973,2 $\pm$ 0,4	0,8041	5,8749	402,5, 22285

## 2. ЭВОЛЮЦИЯ СПЕКТРА КАССИОПЕИ-А ЗА 30 ЛЕТ. ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИСТОЧНИКА

Параметры спектров Кассиопеи-А, приведенные в табл. 2, образуют единую систему с данными табл. 1 /1/, поскольку те и другие определены в одной абсолютной шкале потоков, основанной на методе абсолютных измерений "искусственная Луна". Поэтому дальнейшее исследование основных закономерностей эволюции спектра этого источника проведено на основе совокупности данных, охватывающей интервал времени с 1953 по 1984 гг. Зависимость  $\alpha$  и  $\beta$  от времени представлена на рис. 1 и 2. В интервале с 1964 по 1975 гг. экспериментальные точки расположены приблизительно через год. Параметры спектра в среднем убывают:

$$\alpha(t) = 0,8123 - 0,00081t, \quad (6)$$

$$\beta(t) = 5,8799 - 0,0051t,$$

где  $t$  - время в годах,  $t = 0$  на эпоху 1981.8. Средние скорости уменьшения параметров за 31 год равны

$$\frac{d\alpha}{dt} = -(8,1 \pm 1,6) \cdot 10^{-4}, \quad \frac{d\beta}{dt} = -(5,1 \pm 0,6) \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

На графиках видны значительные отклонения от средних значений (6), достигающие больших величин в ранние эпохи. Расположение точек на графиках возможно представить как выборку из некоторой периодической последовательности:

$$\alpha(t) = 0,8123 - [0,00081 + 0,00227 \cos(60t)^\circ] t, \quad (8)$$

$$B(t) = 5,8799 - [0,0051 + 0,0075 \cos(60t)^\circ] t. \quad (9)$$

На рис. 1 и 2 она нанесена пунктирной линией. Плотность потока на частоте  $\nu$  в среднем убывает, совершая слабые затухающие колебания с периодом 6 лет:

$$\lg S(\nu, t) = 0,8123(7,2386 - \lg \nu) - [0,81(6,2963 - \lg \nu) - 2,27(3,304 - \lg \nu) \cos(60t)^\circ] 10^{-3} t, \quad (10)$$

где  $\nu$  МГц,  $S(\nu)$  Ян,  $t$  - года,  $t = 0$  на эпоху 1981.8.

Аппроксимирующие выражения (8), (9) находились по совокупности экспериментальных данных, представленных в табл. 2 и I/I' для каждого параметра  $\alpha$  и  $B$  независимо друг от друга. Поэтому заслуживает внимания тот факт, что фазы колебаний в обоих случаях совпадают, а соотношение амплитуд таково, что колебания параметра  $B$  целиком обусловлены колебаниями спектрального индекса  $\alpha$ . Из совокупности экспериментальных спектров и обобщающего выражения (10) следует, что при  $\nu_0 = 2013$  МГц

$$\lg S(\nu_0, t) = 3,1961 - 0,002425t \quad (11)$$

и поток линейно убывает со скоростью 0,56% в год. Поскольку  $B = \lg S(\nu_0, t) + \alpha(t) \lg \nu_0$ , то нерегулярная переменность этого параметра является следствием изменений  $\alpha(t)$ . Учитывая это, спектр лучше представить в виде

$$\lg S(\nu) = \lg S(\nu_0, t) - \alpha \lg \frac{\nu}{\nu_0}, \quad (12)$$

в котором параметры определены выражениями (8) и (11).

Из (12) следует, что ВЧ спектр, оставаясь прямым в логарифмическом масштабе, качается относительно точки на частоте  $\nu_0$ , где колебаний нет. Поток на частоте  $\nu < \nu_0$  колеблется в фазе с  $\alpha$ ,

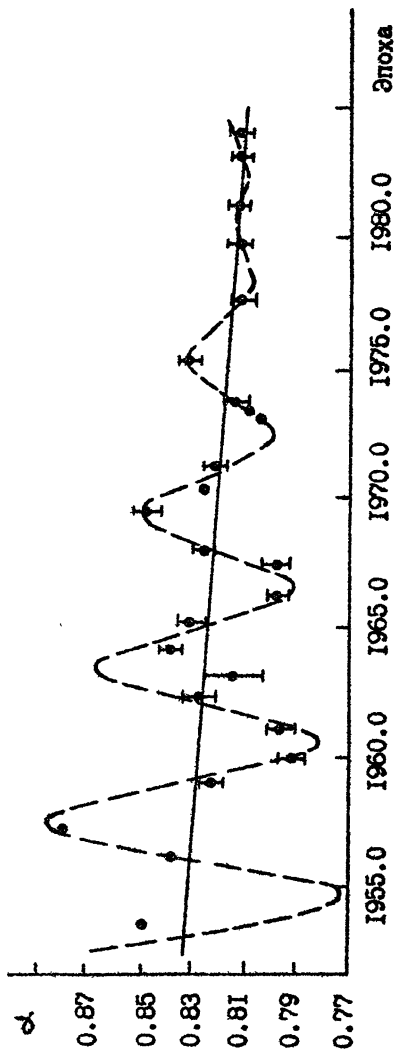


Рис.1. Зависимость спектрального индекса от времени

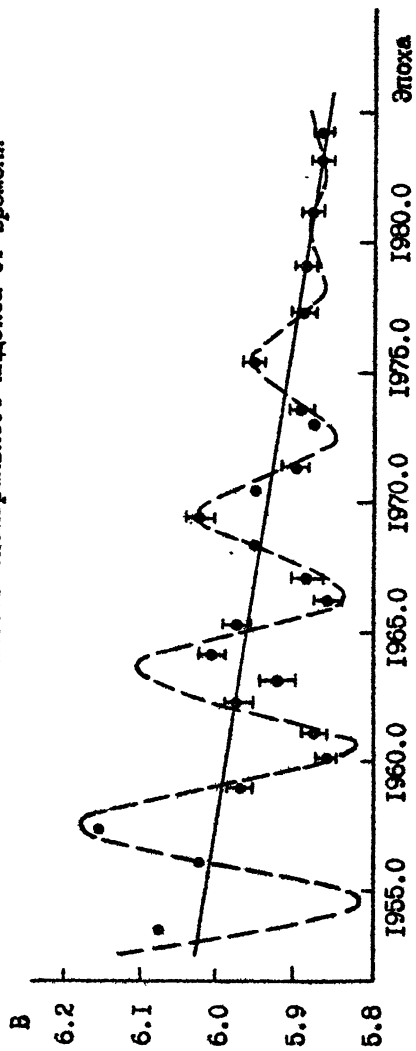


Рис.2. Зависимость параметра  $B$  от времени

на частоте  $\nu > \nu_0$  - в противофазе. Средний наклон спектра постоянно уменьшается. Среднее уменьшение потока за весь наблюдательный период зависит от частоты

$$\Omega(\nu) = -8,1 \cdot 10^{-4} (14,5 - \ln \nu), \quad (13)$$

где  $\nu$  измеряется в мегагерцах.

На частотах 550 и 9770 МГц средние скорости уменьшения потока соответственно равны -0,66% и -0,43% в год. Светимость источника в диапазоне 0,5 - 10 ГГц равна

$$\lg L = 27,963 - 0,00235t (1 - 0,105 \cos(60t))^\circ, \quad (14)$$

где  $L$  измеряется в ваттах,  $t$  - в годах,  $t = 0$  на эпоху 1981. 8.

Светимость  $L$  представляет собой величину, равномерно убывающую со средней скоростью  $(1/L)(dL/dt) = 0,54\% \text{год}^{-1}$  и одновременно слабо осциллирующую с периодом 6 лет. Амплитуда осцилляций с 1953 до 1981 г. равномерно уменьшалась от  $1,5\%L$  до нуля. На эпоху 1981.8  $L = 9,2 \cdot 10^{27}$  Вт.

Заметные отклонения экспериментальных данных от аппроксимирующих выражений (10) и (12) представляют собой редкие исключения. Отклонение спектрального индекса от (8) лишь однажды, в 1963 г., существенно превысило ошибку, хотя большая величина отклонения - 46 - показывает, что оно не случайно.

Значения  $\lg S(\nu_0)$  в зависимости от эпохи, полученные по данным табл. 2 и I/I/, близко следуют линейной зависимости от времени (II). Линия наименьших квадратов для экспериментальных точек совпадает с (II). Отклонения большинства значений  $S(\nu_0)$  от аппроксимации лишь в трех случаях превышают 1,5% (рис. 3). Наиболее значительны отклонения  $\lg S(\nu_0)$  от (II) в спектрах 1966 и 1967 гг. Спектральные индексы в обоих случаях близки к (8), что означает параллельное смещение спектров относительно (10). Например, в спектрах 1966 и 1967 гг. поток в диапазоне 0,5-1 ГГц превышает уровень (10) на 7,5 и 5% соответственно. В целом поток в диапазоне  $0,5 \leq \nu \leq 10$  ГГц, определяемый параметрами  $\alpha$  и  $\beta$  из табл. 2 и I/I/, редко отклоняется от (10) свыше 1,5%.

Экспериментальных данных, относящихся к области низкочастотного спектра Кассиопеи А, значительно меньше, чем в ВЧ области. Тем не менее они позволяют сделать некоторые выводы об особенностях эволюции НЧ спектра.

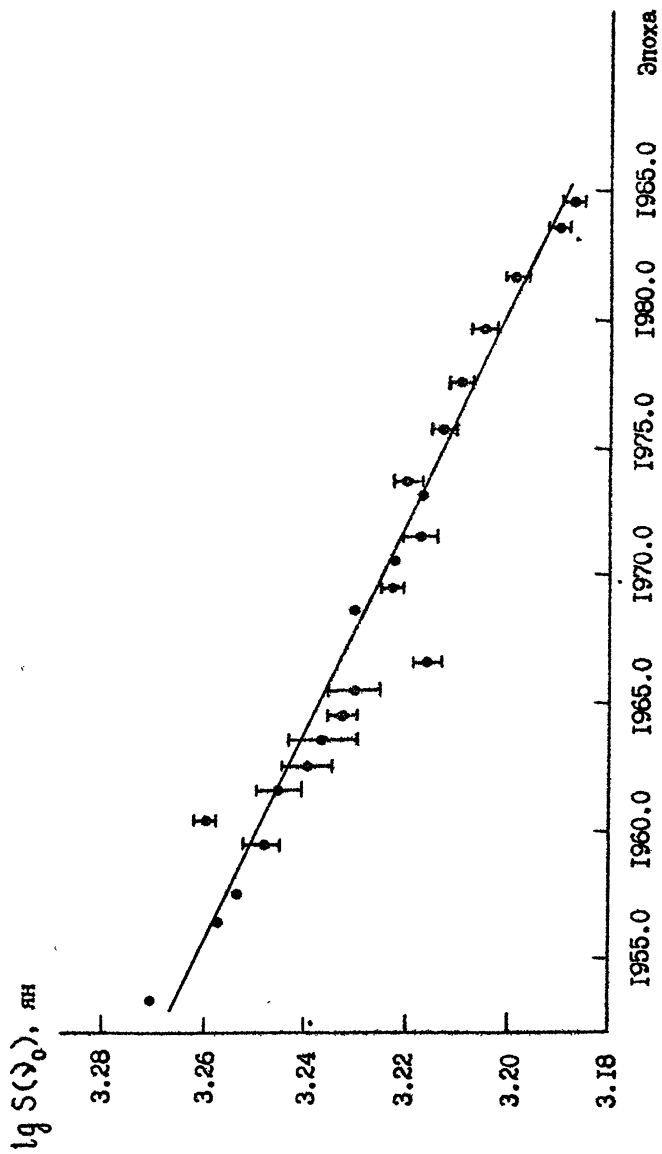


Рис. 3. Зависимость потока на частоте  $\gamma_0 = 2013,6 \text{ МГц}$  от времени

По данным 1957, 1959, 1961 и 1974 гг. спектральный индекс НЧ спектра  $\alpha \approx 0,7$  и не испытывал за это время систематических изменений, выходящих за пределы ошибок. Параметры НЧ спектров Кассиопеи-А, полученные по данным табл. 1, собраны в табл. 3. Средняя скорость векового уменьшения потока на частоте 81,5 МГц, принадлежащей обычно НЧ области спектра, определена равной 1,29% в год /45, 57/. В то же время средняя скорость уменьшения потока в ВЧ области на частоте  $\nu$  определяется (13) и при  $\nu = 81,5$  МГц,  $\Omega(\nu) = 0,82\%$  год<sup>-1</sup>. Кроме того, сохранение в НЧ области зависимости потока от частоты и времени (12) привело бы к колебаниям потока с периодом 6 лет и относительной амплитудой  $\sim \lg(\nu/\nu_0)$ .

Т а б л и ц а 3

Эпоха	$\alpha$	$\nu$	Частоты, МГц
1957.5	0.6805	5.7155	38, 159
1959.3	0.7379 $\pm$ 0.02	5.7782 $\pm$ 0.032	22.2, 22.6, 26, 26.15, 178
1961.6	0.6874 $\pm$ 0.056	5.6532 $\pm$ 0.083	24, 30, 35, 40
1966.9	0.7074	5.6763	38, 81.5
1974.0	0.7025 $\pm$ 0.0082	5.62 $\pm$ 0.017	26.3, 80, 114, 121.5, 144, 184, 236

Отклонения отношений потоков Кассиопеи-А/Лебедь-А, измеренных в работах /45, 57/, от аппроксимации векового уменьшения этой величины с постоянной скоростью 1,29% год<sup>-1</sup>, не превышают 2%, что говорит о равномерности этого процесса в НЧ области. В то же время при жесткой связи ВЧ и НЧ участков спектра некоторые из отклонений должны были достигать 18%.

Следовательно, закономерности эволюции спектра в ВЧ и НЧ областях различны.

В /57/ были получены величины  $\Omega(\nu)$ , равные  $\Omega(\nu) = (1,29 \pm 0,36)\%$  год<sup>-1</sup> при  $\nu = 81,5$  МГц и  $\Omega(\nu) = (1,1 \pm 0,2)\%$  год<sup>-1</sup> при  $\nu = 152$  МГц, что указывает на возможность векового уменьшения  $\alpha$  в НЧ спектре. Однако такая возможность не выходит за пределы ошибок, и предположение с равномерным и одинаковым на всех частотах НЧ спектра убывании потока со скоростью 1,29% год<sup>-1</sup> согласуется с большинством экспериментальных данных. В этом случае параметры НЧ спектра имеют вид

$$\alpha = 0,7025,$$

$$\beta = 5,5766 - 0,005566t, \quad (15)$$

где  $t$  измеряется в годах,  $t = 0$  на эпоху 1981.8.

Некоторые результаты, полученные за предыдущее десятилетие, показывают, что на простую зависимость (15) могут накладываться более сложные процессы.

В связи с этим следует отметить результаты относительных измерений Кассиопея-А/Лебедь-А на частоте 38 МГц /52, 53, 58/. В сравнительно узкой полосе частот, около 38 МГц, наблюдался значительный избыток потока по сравнению с (15), изменявшийся со временем в пределах от 0 до 35%. Эти изменения носили периодический характер: максимумы избытка потока на частоте 38 МГц совпадали по времени с максимумами спектрального индекса  $\alpha$  в ВЧ области. Авторы /58/ аппроксимируют изменения потока, как колебания с периодом 9 лет.

Приращение потока на частоте 151,5 МГц над уровнем (15) до 6% на эпохи 1980.9 и 1982.6 следует из данных /54/. В этой же работе наблюдались синхронные изменения потока на частоте  $\nu = 290$  МГц, но в значительно меньших пределах.

Эти данные показывают: для создания полной картины эволюции НЧ спектра необходимы дальнейшие наблюдения.

### 3. ОБНАРУЖИМОСТЬ ЭФФЕКТА КОЛЕБАНИЙ ПОТОКА С ПЕРИОДОМ 6 ЛЕТ ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ НА ОДНОЙ ЧАСТОТЕ

При наблюдениях на одной частоте колебания потока с периодом 6 лет могут быть обнаружены лишь в случае соблюдения ряда необходимых условий.

а) Наблюдения должны проводиться регулярно в течение времени, сравнимого с периодом колебаний (6 лет) или превосходящего его.

б) Для получения достаточно полной картины изменения потока последовательность измерений не должна прерываться больше чем на год.

в) Относительные ошибки измерений потока не должны превышать трети относительной амплитуды его колебаний.

Из (12) следует, что относительная амплитуда колебаний потока  $\sim \lg(\nu/\nu_0)$  и зависит от эпохи наблюдений. В диапазоне частот 0,5-10 ГГц она максимальна на частоте 10 ГГц и составляет половину



этой величины на частотах 0,9 и 4,5 ГГц. Таким образом, наиболее благоприятны для наблюдения эффекта колебаний потока частоты 0,5-0,9 и 4,5-10 ГГц.

Экспериментальные исследования переменности радиоизлучения Кассиопеи-А начали проводиться с 1960 г. Однако в интервале времени с 1962 по 1967 гг. колебания потока с шестилетним периодом на всех частотах диапазона 0,5-10 ГГц имели малую амплитуду и не могли экспериментально наблюдаться. Поэтому наиболее благоприятные условия для наблюдения этого эффекта существовали с 1968 по 1976 гг. Воспользуемся для определения необходимой точности измерений данными на середину этого интервала времени, эпоху 1972.3.

Согласно (12) относительная амплитуда колебаний потока на частотах 550 и 9770 МГц составила на эту эпоху соответственно 2,8 и 3,5%. Следовательно, регулярные относительные измерения на этих частотах с точностью соответственно не хуже 0,9 и 1,2% позволяют обнаружить эффект. Это видно из рис. 3. /1/ и 4 /1/, показывающих зависимость потока от времени на частотах 550 и 9770 МГц по данным измерений методом "искусственной Луны".

Однако из тех же графиков видно, что непосредственно измеренные потоки, даже с малой случайной ошибкой, не всегда совпадают со значениями "мгновенных" спектров на той же частоте. Отклонения измеренных потоков от линейной аппроксимации спектра, полученной по измерениям на многих частотах, могут быть вызваны разными причинами. В первую очередь следует отметить воздействие скрытых помех и мелкомасштабные особенности самого спектра. Иллюстрациями таких особенностей являются локальные возмущения в спектрах 1966, 1967 и 1973 гг.

Точность относительных измерений Кассиопеи-А/Лебедь-А, близкая к предельно достижимой, была получена в серии, проводившейся на частоте 1,4 ГГц на 26-метровой антенне с 17 июня по 30 сентября 1960 г. /21/. Ошибка нахождения среднего по 60 измерениям составила 0,2% при максимальном разбросе данных в пределах 5%. Поскольку сигналы от обоих источников на входе приемника составляли не менее 150°K, его собственные шумы на точность измерений практически не влияли. Имеющийся разброс данных вызван внешними причинами, в числе которых - быстрая переменность радиоизлучения Кассиопеи-А.

Таким образом, экспериментальная зависимость потока Кассиопеи-А от времени, полученная на одной частоте, даже при высокой точности измерений может существенно отличаться от (12) из-за локальных возмущений спектра. Это видно на примере результата работы /56/ по измере-

18.

нию отношений потоков Кассиопей-А и Лебедя-А на частоте 8 ГГц за время с 1962.6 по 1973.6, где колебания не были обнаружены. Сыграло роль и то, что авторы /56/ отбросили часть данных, имеющих наиболее значительные отклонения от линейной временной зависимости.

На основании многолетних абсолютных измерений спектра Кассиопей-А можно сделать вывод, что значительные локальные возмущения в спектрах Кассиопей-А встречаются сравнительно редко. Следует, однако, признать, что наиболее эффективен для наблюдения колебаний интенсивности метод построения "мгновенных" спектров Кассиопей-А по данным измерений на многих частотах. Это позволяет путем усреднения данных по спектру избежать случайных отклонений отдельных точек, а также исключить из рассмотрения локальные возмущения спектров.

#### 4. СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ ПО ВЕКОВОМУ УМЕНЬШЕНИЮ ПОТОКА КАССИОПЕЙ-А

Сводка данных по вековому уменьшению потока Кассиопей-А приведена в табл. 4, в которой помещены экспериментальные значения скорости уменьшения потока  $\Omega_3$  по опубликованным работам, а также даны  $\Omega_p$  расчетные скорости уменьшения потока Кассиопей-А для частот ВЧ спектра, найденные с помощью выражения (10) и рис. 1 и 2 (на эпохи с 1962.5 по 1968.5). Ниже даны комментарии к табл. 4.

Значение  $\Omega_3$  из /9/, измеренное на частоте 3200 МГц за время между эпохами 1953.9 и 1962.7, составило  $(1,14 \pm 0,26)\% \text{ год}^{-1}$ . В начальную и конечную эпохи были измерены отношения потоков Кассиопей-А и Лебедя-А с ошибками, соответственно 2 и 1%. Отношения потоков этих источников, вычисленные из (10) и /2/ на те же эпохи, согласуются с измеренными в пределах их ошибок. По вычисленным отношениям найдено  $\Omega_p = 0,85\% \text{ год}^{-1}$ , что близко к нижнему пределу  $\Omega_3$  из /9/.

Абсолютные измерения /32/ на частоте 9375 МГц соответствуют эпохам 1961.9 и 1963.9. По ним получено  $\Omega_3 = 1,7\% \text{ год}^{-1}$ . Взяв  $\alpha$  и  $\beta$  из рис. 1 и 2 на соответствующие эпохи, получим  $\Omega_p = 1,5\% \text{ год}^{-1}$ .

В /16/ собраны результаты измерений потоков Лебедя-А, Тельца-А и Девы-А относительно Кассиопей-А на частотах, близких к 1420 МГц за время с 1956.8 по 1971.6. По ним методом наименьших квадратов получено значение  $\Omega_3 = (0,89 \pm 0,12)\% \text{ год}^{-1}$ . Выше отмечалось, что сово-

купность отношений потоков эталонных источников по данным /16/ указывает на нелинейность приемной аппаратуры во время измерений в 1968 и 1970 гг. После коррекции на нелинейность в соответствии с (4) результатов 1968.2, 1970.5 и 1970.9 та же процедура дала  $\Omega_3 = (0,756 \pm 0,053)\% \text{ год}^{-1}$ . Найдя потоки Кассиопеи-А на те же эпохи из (10) и воспользовавшись методом наименьших квадратов, имеем  $\Omega_p = (0,61 \pm 0,06)\% \text{ год}^{-1}$ . Отклонения расчетных отношений потоков эталонных источников и Кассиопеи-А от измеренных не превысили 2,5% для всех эпох.

Т а б л и ц а 4

№ п/п	Частота $\nu$ , МГц	Начало наблюдений	Конец наблюдений	$\Omega_3 (\% \text{ год}^{-1})$	$\Omega_p (\% \text{ год}^{-1})$	Лит-ра
1	81,5	1949.0	1960.9	$1,06 \pm 0,14$		64
2	81,5	1949.0	1969.4	$1,29 \pm 0,08$		45
3	81,5	1949.0	1980.5	$1,29 \pm 0,06$		57
4	152	1968.9	1980.8	$1,1 \pm 0,2$		57
5	600	1964.2	1971.6	0,8	0,9	5
6	860	1964.2	1971.6	0,7	0,8	5
7	927	1962.8	1977.85	$0,94 \pm 0,04$	0,61	11
8	960	1964.2	1972.3	$0,85 \pm 0,05$	0,88	50
9	960	1972.3	1981.4	$0,413 \pm 0,08$	0,47	55
10	1400	1960.5	1960.7	$0,9 \pm 2,3$		21
11	1420	1956.8	1971.6	$0,89 \pm 0,12$	$0,61 \pm 0,06$	16
12	1440	1960.3	1964.2	$1,75 \pm 0,52$		63
13	1440	1960.3	1971.6	$1,38 \pm 0,15$	0,59	39
14	2924	1962.7	1979.9	$0,8 \pm 0,07$	0,71	60
15	3000	1961.0	1971.5	$0,92 \pm 0,15$	0,68	16
16	3060	1961.9	1971.6	$1,04 \pm 0,21$	0,57	5
17	3200	1953.9	1962.7	$1,14 \pm 0,26$	0,85	9
18	8000	1962.8	1973.7	$0,7 \pm 0,07$	0,45	56
19	9375	1961.9	1963.9	1,7	1,5	32
20	9375	1961.9	1971.6	$0,63 \pm 0,12$	0,61	5

Сравнение потоков эталонных источников, измеренных относительно Кассиопеи-А на эпоху 1961.0 на частоте 3000 МГц /25/, и аналогичных собственных измерений на частоте 2667 МГц на эпоху 1971.5 сделано в /16/. Для частоты 3000 МГц на соответствующий интервал времени получено  $\Omega_3 = (0,92 \pm 0,15)\% \text{ год}^{-1}$ . Следует, однако, заметить, что поправка результата /25/ на поляризацию Лебеда-А, составившая в /16/ 20

2%, выглядит неоправданно большой. По данным /59/ степень поляризации на частоте 3175 МГц не превосходит 1%. Пользуясь неисправленным результатом /25/ и опираясь только на отношение потоков Лебеда-А и Кассиопеи-А, имеем  $\Omega_3 = 0,7\%$  год<sup>-1</sup>. Вычислив потоки Кассиопеи-А на те же эпохи из (10), получим  $\Omega_p = 0,68\%$  год<sup>-1</sup>.

По данным абсолютных измерений, проводившихся в 1961 и 1971 гг. на частоте 9375 МГц, в /5/ получена величина  $\Omega_3 = (0,63 \pm 0,12)\%$  год<sup>-1</sup>. Расчетное значение для того же интервала времени составило  $\Omega_p = 0,61\%$  год<sup>-1</sup>.

Абсолютные измерения на частоте 3060 МГц были проведены в 1961 и 1971 гг. /5/. По их данным для этого временного интервала получено значение  $\Omega_3 = (1,04 \pm 0,21)\%$  год<sup>-1</sup>. На основании (10)  $\Omega_p = 0,57$  при тех же начальной и конечной эпохах. Столь большое расхождение может быть объяснено существованием в спектре 1961 г. локального возмущения.

Из относительных измерений Лебедь-А/Кассиопея-А на частоте 960 МГц для эпох 1964.2 и 1972.3 в /50/ получено  $\Omega_3 = (0,85 \pm 0,05)\%$  год<sup>-1</sup>. Его можно сопоставить с расчетным на тот же промежуток времени, равным  $\Omega_p = 0,88\%$  год<sup>-1</sup>.

В /5/ для интервала времени между 1964 и 1971 гг. и диапазона частот 600-860 МГц получено  $\Omega_3 = (0,7 \pm 0,8)\%$  год<sup>-1</sup>. Соответствующее расчетное значение  $\Omega_p = (0,83 \pm 0,95)\%$  год<sup>-1</sup>.

В /56/ представлены результаты измерений отношения потоков Кассиопеи-А и Лебеда-А на частоте 8 ГГц, продолжавшихся с 1962.6 по 1973.6. По всей совокупности данных получена величина  $\Omega_3 = (0,7 \pm 0,07)\%$  год<sup>-1</sup>.

Выше было показано, что поток на частоте 8 ГГц в эти годы имел значительные отклонения от (10), и воспроизвести расчетным путем его временное распределение в точном соответствии с /56/ невозможно. Согласно (13) средняя скорость уменьшения потока на 8 ГГц  $\Omega_p = 0,45\%$  год<sup>-1</sup>.

В /11/ определена величина  $\Omega_3$  на частоте 927 МГц для интервала времени между эпохами 1962.8 и 1977.85. По двум измерениям, выполненным в начальную и конечную эпохи,  $\Omega_3 = (0,94 \pm 0,04)\%$  год<sup>-1</sup>.

Измерения 1962 г. были абсолютными, с калибровкой по "искусственной Луне" /29/. Были измерены потоки Кассиопеи-А, Лебеда-А и еще трех источников. Поток Лебеда-А измерялся при отведении антенны в определенную опорную область.

Отношение потоков Кассиопеи-А и Лебеда-А было повторно получено при той же методике измерений для Лебеда-А на эпоху 1977.85.

Следует отметить, что абсолютное значение потока Кассиопеи-А по

данным /29/ хорошо согласуется со средним спектром на эпоху 1962.7.

На эпоху 1977.7 имеется подробный спектр Кассиопеи-А, измеренный методом "искусственной Луны" /I/, из которого поток на частоте 927 МГц определяется с ошибкой менее 0,5%. Сравнивая потоки Кассиопеи-А из /29/ и из спектра 1977.7, находим  $\Omega_3 = (0,54 \pm 0,15)\% \text{ год}^{-1}$ . Рассчитанное с помощью (10) и табл. 2 значение  $\Omega_p$  составило  $\Omega_p = 0,61\% \text{ год}^{-1}$ , что находится в хорошем соответствии с данными абсолютных измерений и не согласуется с результатом /II/. Можно предположить, что определение  $\Omega_3$  в /II/ содержит неточность из-за неидентичности антенн в начальном и конечном экспериментах.

На частоте 2924 МГц сравнивались отношения потоков Кассиопеи-А и Лебедя-А, измеренные на эпохи 1962.7 и 1979.9 /60/. Получено  $\Omega_3 = (0,8 \pm 0,07)\% \text{ год}^{-1}$ . Рассчитанное по (10) и табл. 2 значение  $\Omega_p = 0,71\% \text{ год}^{-1}$ , что близко к нижнему пределу  $\Omega_3$ .

На частоте 960 МГц на антенне с высоким угловым разрешением измерены отношения потоков Кассиопеи-А и Лебедя-А для эпох 1972.3 и 1981.4 /55/. Найдено  $\Omega_3 = (0,413 \pm 0,08)\% \text{ год}^{-1}$ . Расчет по (10) дает  $\Omega_p = 0,47\% \text{ год}^{-1}$ , что в пределах ошибок согласуется с  $\Omega_3$ .

Абсолютные измерения потока Кассиопеи-А на частоте 1440 МГц, проводившиеся на большой рупорной антенне с 1960 по 1971 гг. /39/, составляют длительную серию. Методом наименьших квадратов по их данным определена величина  $\Omega_3 = (1,38 \pm 0,15)\% \text{ год}^{-1}$ . Это значение существенно превосходит все другие, найденные для сравнимых по длительности временных интервалов в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн.

Измерения на первом этапе этой работы (с 1960 по 1964 гг.) дали высокие значения потока, быстро менявшиеся в пределах до 8%.

Данные /39/ за 1971 г. не отличаются от (10). Среднее значение  $\Omega_p$  на частоте 1440 МГц, согласно (13), составляет  $0,59\% \text{ год}^{-1}$ .

Сравнительный анализ с учетом сделанных в комментарии замечаний показывает, что полученные из эксперимента значения скорости уменьшения потока  $\Omega_3$  и вычисленные значения  $\Omega_p$  более чем в половине случаев совпадают. В других случаях их различие, как правило, не выходит за пределы ошибок более чем на  $0,05\% \text{ год}^{-1}$  в ту и другую стороны. Лишь в четырех случаях отличия велики, что может найти объяснение в особенностях поведения источника и неконтролируемых ошибках эксперимента. Наблюдаемое соответствие экспериментальных и расчетных данных подтверждает правильность найденной зависимости спектра Кассиопеи-А от времени.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По имеющимся экспериментальным данным вековое изменение потока на низких ( $\nu < 300$  МГц) и высоких ( $\nu > 300$  МГц) частотах существенно различно. Его не удается объяснить в рамках однокомпонентной модели источника. Замедление падения потока на сантиметровых волнах можно представить только за счет компенсации при введении дополнительной возрастающей во времени, компоненты излучения. Это могла быть непрерывная инжекция релятивистских частиц, спектр излучения которых имеет завал на частотах ниже 300–400 МГц, а на высоких частотах совпадает со спектром оболочки.

В результате обнаружения мягкого рентгеновского излучения от известных галактических остатков оказалась большой масса ионизированного газа: Кеплера ( $7M_{\odot}$ ), Тихо ( $4M_{\odot}$ ), Кассиопея ( $15M_{\odot}$ ). Поскольку плазма сильно турбулизована, следует ожидать, что плазменные и комptonовские механизмы излучения релятивистских электронов могут быть существенны для этих источников. Падение плотности потока остатка сверхновой получается в результате уменьшения интенсивности синхротронного излучения при адиабатическом расширении остатка, которое на высоких частотах частично компенсируется излучением плазмы. Для объяснения наблюдаемой средней частотной зависимости уменьшения потока Кассиопеи-А достаточно, чтобы плотность энергии лемгмюровских волн составили 2% от тепловой /61/.

Особым является вопрос о периодичности малых колебаний спектрального индекса Кассиопеи-А. Если они реальны, то единственной возможностью объяснить эти колебания может быть только переменность инжекции релятивистских электронов в оболочку. При этом источником релятивистских электронов должен быть компактный объект, вращающийся или прецессирующий с периодом 6 лет.

В остатке сверхновой Кассиопея-А не заметили точечных рентгеновских источников с температурой больше  $2 \cdot 10^6$  К, предполагаемой для релятивистских объектов. С другой стороны, на дециметровых волнах обнаружен компактный источник, по спектру излучения и угловым размерам подобный компактному источнику в Крабовидной туманности вокруг пульсара /62/. Периодичность колебаний и их механизм еще требуют дальнейших исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Барабанов А.П., Иванов В.П., Станкевич К.С., Столяров С.П. Препринт № 207, Горький: НИРФИ, 1986.
2. Иванов В.П., Станкевич К.С. - Изв. Вузов - Радиофизика, 1986, т.29, № 1, с. 3.
3. Барабанов А.П., Иванов В.П., Малышев И.А., Станкевич К.С., Столяров С.П. - А.ж., 1986 (в печати).
4. Иванов В.П., Станкевич К.С. - В кн.: XV Всесоюзная конференция по галактической и внегалактической радиоастрономии. Тезисы докладов. Харьков, 1983, с.135.
5. Станкевич К.С., Иванов В.П., Пелюшенко С.А., Торхов В.А., Иванникова А.Н. - Изв. Вузов - Радиофизика, 1973, т.16, № 5, с.786.
6. Hey J.S., Hughes V.A. - Nature, 1954, v.173, N4409, p.819.
7. Adgie R., Smith F.G. - Observatory, 1956, v.76, N894, p.181.
8. Kraus J.D., Ko H.C., Matt S. - Astronom.J., 1954, v.59, N11, p.439.
9. Mayer C.H., Mc Cullough I.R., Sloanaker R.M., Haddock F.T. - Astrophys. J. 1965, v.141, N3, p.867.
10. Seeger C.L., Westerhout G., Van de Hulst H.C. - BAN, 1956, v.13, N472 p.89.
11. Виняйкин Е.Н., Разин В.А. - Астрон.ж., 1979, т.56, № 5, с.913.
12. Westerhout G. - BAN, 1958, v.14, N488, p.215.
13. Whitfield G.R. - Mon.Not.R.Astr.Soc. 1960, v.120, N6, p.581.
14. Edge D.O., Shakeshaft J.K., Mc Adam W.B., Baldwin J.E., Archer S., Memoirs R.- Astr.Soc. 1959, v.68, p.7.
15. Davis M.M., Gelato-Volders L., Westerhout G. - BAN, 1965, v.18, N1, p.42.
16. Baars J.W.M., Hartsuijker A.P. - Astron.Astrophys. 1972, v.17, N2, p.172.
17. Lovell A.C.B., Wells H.W. - Mon.Not.R.Astr.Soc., 1960, v.121, N1, p.111.
18. Elsmore B., Ryle M., Leslie P.R.R.-Memoirs R.Astr.Soc. 1959, v.68, p.61.
19. Heeschen D.S.-Astrophys.J.1961, v.133, N1, p.322.

20. Sloanaker R., Nichols J.H. - *Astronom. J.*, 1960, v. 65, N3, p. 109.
21. Heeschen D.S., Meredith B.L. - *Nature*, 1961, v. 190, N4777, p. 705.
22. Кузьмин А.Д., Левченко М.Т., Носкова Р.И., Саломонович А.Е. - *А.ж.*, 1960, т. 37, №6, с. 975.
23. Брауде С.Я. - *Изв. вузов - Радиофизика*, 1965, т. 8, №2, с. 229.
24. Conway R.G., Moras M. - *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, 1964, v. 127, N5, p. 377.
25. Heeschen D.S., Meredith B.L. - *Publications NRAO*, 1961, v. 1, N8, p. 121.
26. Станкевич К.С. - *А.ж.*, 1962, т. 39, №4, с. 610.
27. Mac Rae D.A., Seaquist E.R. - *Astronom. J.*, 1963, v. 68, N2, p. 77.
28. Ласточкин В.П., Порфирьев В.А., Станкевич К.С., Троицкий В.С., Холодилов Н.Н., Цейтлин Н.М. - *Изв. вузов - Радиофизика*, 1963, т. 6, №3, с. 629.
29. Разин В.А., Федоров В.Т. - *Изв. вузов - Радиофизика*, 1963, т. 6, №5, с. 1052.
30. Ласточкин В.П., Планкин Э.С., Станкевич К.С. - *Изв. вузов - Радиофизика*, 1963, т. 6, №3, с. 631.
31. Conway R.G., Daintree E.J., Long R.J. - *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, 1965, v. 131, N2, p. 159.
32. Ласточкин В.П., Станкевич К.С. - *А.ж.*, 1964, т. 41, №4, с. 769.
33. Ласточкин В.П., Лукин Э.Б., Станкевич К.С., Цейтлин Н.М. - *А.ж.*, 1965, т. 42, №4, с. 705.
34. Бондарь Л.Н., Кротиков В.Д., Станкевич К.С., Цейтлин Н.М. - *Изв. вузов - Радиофизика*, 1965, т. 8, №3, с. 437.
35. Medd W.J. - *Astrophys. J.*, 1972, v. 171, N1, p. 41.
36. Vaars J.W.M., Mezger P.G., Wendker H. - *Astrophys. J.*, 1965, v. 142, N1, p. 122.
37. Dent W.A., Haddock F.T. - *Astrophys. J.*, 1966, v. 144, N2, p. 568.
38. Roger R.S., Costain C.H., Lacey J.D. - *Astronom. J.*, 1969, v. 74, N3, p. 366.
39. Findlay J.W. - *Astrophys. J.*, 1972, v. 174, N3(1), p. 527.
40. Wilson R.W., Penzias A.A. - *Astrophys. J.*, 1966, v. 146, N1, p. 286.



41. Horton P.W., Conway R.G., Daintree E.J. - Mon. Not. R. Astr. Soc., 1969, v. 143, N3, p. 245.
42. Allen R.J., Barrett A.H. - Astrophys. J., 1967, v. 149, N1, p. 1.
43. Parker E.A. - Mon. Not. R. Astr. Soc., 1968, v. 138, N4, p. 407.
44. Mezger P.G., Schraml J. - Astron. J., 1966, v. 71, N9, p. 864.
45. Scott P.F., Shakeshaft J.K., Smith M.A. - Nature, 1969, v. 223, N5211, p. 1139.
46. Андриевский А.Е., Спангенберг Е.Е., Вальтц И.Е., Гиндилис Л.М., Горшков А.Г., Иванов В.Н., Конникова В.К., Курильчик В.Н., Ларионов М.Г., Моисеев И.Г., Никитин В.В., Портман В.Н., Соглазнов В.А. - Астрон. циркуляр, 1969, №494, с. 1.
47. Hobbs R.W., Corbett H.H., Santini N.J. - Astronom. J., 1969, v. 74, N6, p. 824.
48. Wrixon G.T., Gott J.R., Penzias A.A. - Astrophys. J., 1972, v. 174, N2, p. 399.
49. Иванов В.П., Станкевич К.С. Отчет по НИР "Гранат", г. Горький, № государственной регистрации 81038843, с. 95.
50. Станкевич К.С., Иванов В.П., Торхов В.А. - А.ж., 1973, т. 50, №3, с. 645.
51. Janssen M.A., Golden L.M., Welch W.J. - Astron. Astrophys. 1974, v. 33 N3, p. 373.
52. Ericson W.C., Perley R.A. - Astronom. J. 1975, v. 200, N2, p. L83.
53. Read P.L. - Mon. Not. R. Astr. Soc. 1977, v. 178, p. 259.
54. Вилишкин Е.Н. - В кн.: XV Всесоюзная конференция по галактической и внегалактической радиоастрономии. Тезисы докладов. Харьков, 1983, с. 137.
55. Иванов В.П., Бубукин И.Т., Станкевич К.С. - Письма в А.ж., 1982, т. 8, №2, с. 83.
56. Dent W.A., Aller H.D., Olsen E.T. - Astrophys. J., 1974, v. 188, N1, p. L11.
57. Агафонов М.И., Станкевич К.С. - Письма в А.ж., 1981, т. 7, № 10, с. 612.
58. Walczowski L.T., Smith K.L. - Mon. Not. R. Astr. Soc. 1985, v. 212, p. 27.

59. Mayer G.H., Mc Cullough T.P., Sloanaker R.M.- *Astronom.J.* 1962,  
v.67,N9,p.581.
60. Виняйкин Е.Н., Разин В.А., Хрулев В.В. - *Письма в А.ж.*, 1980, т.6,  
№ 10, с. 620.
61. Стаңкевич К.С. - *Письма в А.ж.*, 1986 (в печати).
62. Вовкоон V.P., Zhouck I.N.- *Astrophys.Space Sci.* 1981,v.79,p.181.
63. Findlay J.W., Hvatum H., Waltman W.B.- *Astrophys.J.* 1965,v.141,N3,  
p.873.
64. Högbon J.A., Shakeshaft J.R.- *Nature*, 1961,v.189,N4764, p.561.

Дата поступления статьи  
15 августа 1986 года

**Валерий Павлович Иванов**  
**Казимир Станиславович Станкевич**

**ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ СПЕКТРА  
ОСТАТКА СВЕРХНОВОЙ. КАССИОПЕЯ-А. II.**

---

Подписано в печать 13.11.86 г. МЦ 01218. Формат 60 x 84/16  
Бумага мвожяательная. Печать офсетная. Объем 1,75 усл. печ. л.  
Заказ 4488. Тираж 120. Бесплатно.

---

Отпечатано на ротационной Н И Р Ф И