

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 № 207

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ СПЕКТРА
ОСТАТКА СВЕРХНОВОЙ КАССИОПЕИ-А. I.

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

Горький 1986

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

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ СПЕКТРА
ОСТАТКА СВЕРХНОВОЙ КАССИОПЕИ-А. I. Горький, Препринт № 207/НИРФИ,
1986.

УДК 523.164.4

Приведены результаты абсолютных измерений потоков и спектров остатка сверхновой Кассиопея-А после 1971 года, выполненных методом "искусственной Луны". Дан анализ предельной точности абсолютных измерений.

Получены новые данные о вековом уменьшении спектрального индекса и частотной зависимости скорости падения потока и их временных вариациях. Обсуждаются вопросы эволюции радиоизлучения источника.

Впервые возможность изменения интенсивности радиоизлучения дискретных источников была предсказана И.С.Шкловским для остатков сверхновых /1/. Было показано, что у остатка сверхновой Кассиопея-А вследствие адиабатического расширения оболочки должно наблюдаться уменьшение потока со скоростью 2% в год равномерно на всех частотах. Изучение эффекта чрезвычайно важно для эволюции этого класса объектов. Поэтому экспериментальные исследования, начатые в 60-х годах, интенсивно продолжались в последующие годы.

Предсказанный эффект был обнаружен по результатам имевшихся измерений за период 1948-1960 г. на частоте 81 МГц /2/. Вскоре было установлено, что уменьшение потока имеет место и на очень коротких волнах, $\lambda = 3$ см включительно /3-5/.

Эволюция радиоизлучения остатка сверхновой Кассиопея-А изучалась на радиоастрономической станции Кара-Даг методом абсолютных измерений интенсивностей в спектре излучения источника. Первые измерения были сделаны в 1961 году, после 1967 года они велись систематически. При сравнении данных абсолютных измерений интенсивности Кассиопеи-А в диапазоне 0,5 - 10 ГГц, выполненных в 1962, 1967 и 1969 годах, было установлено, что скорость уменьшения потока зависит от частоты /2/. После измерений 1971 г. было получено детальное распределение скоростей уменьшения потока по диапазону /9/. Эффект частотной зависимости был исследован нами также при относительных измерениях /10/.

Независимо к аналогичному выводу пришли авторы /8/, измерившие скорость падения потока на частотах 1420 и 3000 МГц, которая оказалась меньше, чем на 81,5 МГц /7/, и позднее - авторы /11/. Величина средней скорости падения потока в зависимости от частоты была установлена по 15-летнему интервалу, в течение которого абсолютные измерения потоков Кассиопеи-А проводились на двух десятках длин волн в диапазоне от 0,5 до 10 ГГц; она хорошо аппроксимируется функцией вида /23, 24/

$$\Omega(\nu) = -1,25 \cdot 10^{-3}(29 - \lg \nu), \text{ где } \nu [\text{Гц}]. \quad (1)$$

В этих работах было также показано, что частотная зависимость падения плотности потока должна быть следствием уменьшения спектрального индекса источника.

Уменьшение среднего спектрального индекса источника со временем было обнаружено экспериментально и соответствующие данные на различные эпохи приведены в /9, 22, 19/. Но наряду с установленными закономерностями для средних характеристик спектра были также обнаружены значительные вариации во времени величин спектральных индексов и изменений потоков, включая их рост в отдельные эпохи /9, 22, 24, 19, 14/.

Эволюция радиоизлучения молодого остатка сверхновой Кассиопея - А оказалась сложным явлением. Чтобы представить полную картину этого явления, потребовалось наряду с продолжением абсолютных измерений провести анализ всех опубликованных данных измерений потока с 1953 г. до наших дней. С помощью точных спектров первичных и вторичных эталонов /30, 29/ по опубликованным данным измерений восстановлены спектры Кассиопеи-А на каждый год с 1953 г. Эти спектры имеют абсолютную привязку к шкале потоков, основанной на абсолютных измерениях по методу "искусственной Луны", и образуют единую систему со спектрами Кассиопеи, непосредственно полученными при абсолютных измерениях этим методом. В результате было обнаружено новое явление: затухающие колебания с периодом 6 лет спектрального индекса и интенсивности; для последней амплитуда и фаза имеют частотную зависимость. При учете осцилляций изменились величины средних изменений спектрального индекса и распределения скорости уменьшения потока по спектру источника. Предварительные результаты этих исследований сообщались в /17, 18/. Ниже, в первой статье, изложены методы и результаты абсолютных измерений по исследованию эволюции радиоизлучения остатка сверхновой. Поскольку источник Кассиопея-А используется как первичный эталон во многих радиоастрономических шкалах интенсивностей и для измерения параметров антенн, то первичные данные абсолютных измерений потоков этого источника на прошедшие эпохи имеют самостоятельное значение. Они приведены в табл. I - 7 приложения.

Абсолютные измерения распределения мощности по спектру радиоизлучения остатка сверхновой Кассиопея-А выполнялись в диапазоне от 0,5 до 10 ГГц с использованием калибровки усиления антенны по методу "искусственной Луны". Метод окончательно сложился к 1969 году и в после-

дующие годы процедура измерений полностью повторялась /9/. При измерениях по методу "искусственной Луны" температура антенны при приёме дискретного источника $n_{и}$ сравнивается с температурой антенны от собственного излучения абсолютно чёрного диска n_{g} . "Фокусировка" антенны производится при выносе облучателя из фокуса таким образом, чтобы усиление антенны на бесконечности G_{∞} было таким же, как в месте расположения калиброванного диска G_R . Плотность потока от дискретного источника равна

$$S(\nu) = \frac{2k}{\lambda^2} \frac{n_{и}}{n_{g}} T_{og} e^{\chi_{и} - \chi_{g}} \Theta_g \bar{F} \left(1 - \frac{T_{\phi}}{T_{og}} \right) \frac{G_R}{G_{\infty}}, \quad (2)$$

где Θ_g - телесный угол диска, $\chi_{и}$ и χ_g - оптический путь в атмосфере в направлении источника и диска, T_{og} - температура диска, T_{ϕ} - температура распределённого космического радиоизлучения в направлении диска, $\bar{F}_g = \frac{1}{\Theta_g} \int_{\Theta_g} F d\theta$, F - диаграмма антенны.

Метод измерения имеет высокую точность /28/, и систематическая ошибка при определении потока зависит, главным образом, от разности усиления антенны при перефокусировке и поправок к температуре радиоизлучения диска из-за дифракции и отражательных свойств поглощающего материала. В наших измерениях ошибка составляет 2-3%, и её величина обеспечивается выбором параметров системы "антенна-диск" /9/. Измерения на частотах 0,5-2 ГГц выполнялись на параболической антенне диаметром 12 м, для частот 2-10 ГГц использовалась параболическая антенна диаметром 7 м. Оба радиотелескопа калибровались по излучению чёрного диска диаметром 4,75 м, удалённого от них на расстояние $R = 520$ м. Для калибровки РТ-7 на частоте 10 ГГц применяется диск диаметром 60 см, находящийся также на расстоянии 520 м.

При $R\lambda / D^2 > 0,3$ для фокусировки достаточны малые выносы облучателя из фокуса на величину $\Delta < \lambda$, при этом усиление антенны меняется мало: $\delta G / G < \Delta / \phi \approx 1\%$ (ϕ - фокусное расстояние зеркала). Специально выбранный рельеф местности для установки эталонного диска и его размеры $d/\lambda > 10$ обеспечили малость дифракционной поправки к температуре его радиоизлучения (< 2%).

Из (2) следует, что случайная ошибка измерений плотности потока радиоизлучения источника равна

$$\frac{\sqrt{\langle \Delta S \rangle^2}}{\langle S \rangle} = \sqrt{\frac{\langle \Delta n_{и} \rangle^2}{\langle n_{и} \rangle^2} + \frac{\langle \Delta n_{g} \rangle^2}{\langle n_{g} \rangle^2} + \frac{\langle \Delta G_{\infty} \rangle^2}{\langle G_{\infty} \rangle^2}} \quad (3)$$

и зависит, главным образом, при единичном отсчёте от флуктуационной чувствительности радиометров.

В диапазоне 0,5–4 ГГц применялись супергетеродинные приёмники модуляционного типа с полосой пропускания 5–15 МГц и чувствительностью 0,3° К при постоянной времени $\tau = 1$ с. Они имеют плавную перестройку в диапазонах 0,5 – 1 ; 1 – 2 , 2 – 4 ГГц. На 10 ГГц применялся модуляционный приёмник прямого усиления с чувствительностью около 0,1° К при $\tau = 1$ с. Все приёмники имеют идеальную линейность в динамическом диапазоне измерявшихся сигналов.

В /20/ показано, что при приёме дискретного источника возможны флуктуации усиления антенны G_∞ , обусловленные турбулентными процессами в атмосфере. При заданных размерах антенны флуктуации усиления слабо растут с уменьшением длины волны, и для РТ-7 по порядку величин равны

$$\frac{\sqrt{(\Delta G)^2}}{\langle G_\infty \rangle^2} \approx \left(\frac{8}{\lambda}\right)^{0,54} \cdot (2,5 \pm 0,6)\%, \text{ где } \lambda \text{ [см]}. \quad (4)$$

Особенно сложной является оценка ошибок, возникающих в результате воздействия помех. В настоящее время точные абсолютные измерения потоков приходится проводить в условиях всё усложняющейся помеховой обстановки. Помеха относительно легко распознаётся, когда она воздействует на сигнал в полосе приёмника, и тогда она может быть отфильтрована при перестройке по частоте. Сильная помеха, действуя на усилитель вне полосы приёма (скрытая помеха), может менять режим усиления. В результате возможны вариации в отношении антенных температур n_n/n_g .

Уменьшение случайной ошибки измерений потока источника достигалось при усреднении множества записей источника и диска, полученных на каждой из частот. С целью дополнительного ослабления флуктуаций усиления приёмной аппаратуры измерения проводились циклами, состоящими из записи радиоизлучения диска, источника и снова диска, длительность цикла составляла 20 – 30 минут. Единичным отсчётом являлось отношение антенной температуры источника к средней величине антенной температуры диска за цикл. На каждой из частот за 2 – 4 дня наблюдений набиралось около 50 записей источника, содержащихся в 20 – 25 циклах. Вычислялось среднее значение потока $S(\nu)$, которое проводится в

табл. I - 7 приложения, при этом случайная ошибка получалась менее 2%. В среднем по исследуемому диапазону случайная ошибка составляла около $\sigma_{сл} = 1\%$.

С целью дополнительного контроля скрытых помех, которые могут искажать калибровочный сигнал от диска, после 1971 г. несколько изменена методика наблюдений. В единичный цикл включили, кроме регистрации радиоизлучения от диска и Кассиопеи-А, приём источника Лебедь-А, наряду с диском играющего роль эталона радиоизлучения. Измеряемые при этом потоки Лебедя-А содержат значительную систематическую ошибку, поскольку фон вокруг этого источника яркий и неоднородный, а радиотелескопы RT-7 и RT-12 не обеспечивают достаточного углового разрешения. Тем не менее, данные о потоках Лебедя-А на каждой из частот хорошо повторяются, и по многолетним абсолютным измерениям с большой точностью построен спектр этого источника, специфичный для данных антенн и выбранных областей отведения. Он используется как дополнительный эталон для контроля потока Кассиопеи-А по относительным измерениям. Кроме того, совпадение данных абсолютных измерений Лебедя со средним спектром этого источника являлось средством дополнительного контроля проводящегося эксперимента.

Для получения точного детального распределения энергии по спектру радиоизлучения Кассиопеи-А абсолютные измерения в диапазоне 0,5-10 ГГц проводились на 25-30 частотах. Имея в виду исследование эволюции излучения остатка сверхновой, измерения на всех частотах выполнялись за минимально необходимое время, 3-4 месяца, в результате получался мгновенный спектр на соответствующую эпоху. Начиная с 1967 г. такие спектры снимались регулярно с интервалом в два года.

Результаты измерений потоков за период 1973-1984 годов приведены в табл. I-7 приложения, более ранние данные 1967, 1969 и 1971 годов опубликованы в /26, 27, 9/. Вообще мгновенные спектры Кассиопеи в диапазоне 0,5 - 10 ГГц хорошо описываются линейной в логарифмическом масштабе зависимость

$$\lg(S(\nu)) = B - \alpha \lg \nu, \quad (5)$$

где $S(\nu)$ - плотность потока на частоте ν и α - спектральный индекс, B - параметр абсолютной привязки спектра.

Параметры каждого мгновенного спектра α и B найдены методом наименьших квадратов, они приведены в табл. I. Большое число точек поз-

Т а б л и ц а I

Эпоха	δ	B	$S_1, \Gamma\text{Ц}$	$\sigma(S_1\Gamma\text{Ц})$ %	$S_1, \Gamma\text{Ц}$	Диапазон частот, ГЦ
1967.6 ± 0,1	0,7991 ± 0,0151	5,8919 ± 0,0438	3122,5 ± 0,18	0,58	0,5 ± 1	
1969.6 ± 0,2	0,8498 ± 0,0052	6,0301 ± 0,0161	3025 ± 0,10	0,36	0,5 ± 10	
1971.6 ± 0,2	0,8211 ± 0,0122	5,9308 ± 0,0410	2934 ± 0,38	1,29	0,6 ± 10	
1973.6 ± 0,2	0,8088 ± 0,0047	5,8929 ± 0,0149	2928 ± 0,11	0,39	0,5 ± 10	
1975.7 ± 0,2	0,8320 ± 0,0044	5,9620 ± 0,0140	2924 ± 0,11	0,38	0,55 ± 10	
1977.7 ± 0,15	0,8119 ± 0,0047	5,8916 ± 0,0152	2857 ± 0,125	0,43	0,5 ± 10	
1979.6 ± 0,2	0,8120 ± 0,0044	5,8872 ± 0,0141	2826 ± 0,11	0,39	0,55 ± 10	
1981.6 ± 0,15	0,8135 ± 0,0054	5,8858 ± 0,0169	2788 ± 0,10	0,38	0,5 ± 4	
1983.6 ± 0,1	0,8119 ± 0,0038	5,8730 ± 0,0123	2737 ± 0,09	0,33	0,5 ± 10	
1984.6 ± 0,15	0,81415 ± 0,0038	5,8771 ± 0,0121	2721 ± 0,09	0,33	0,5 ± 10	

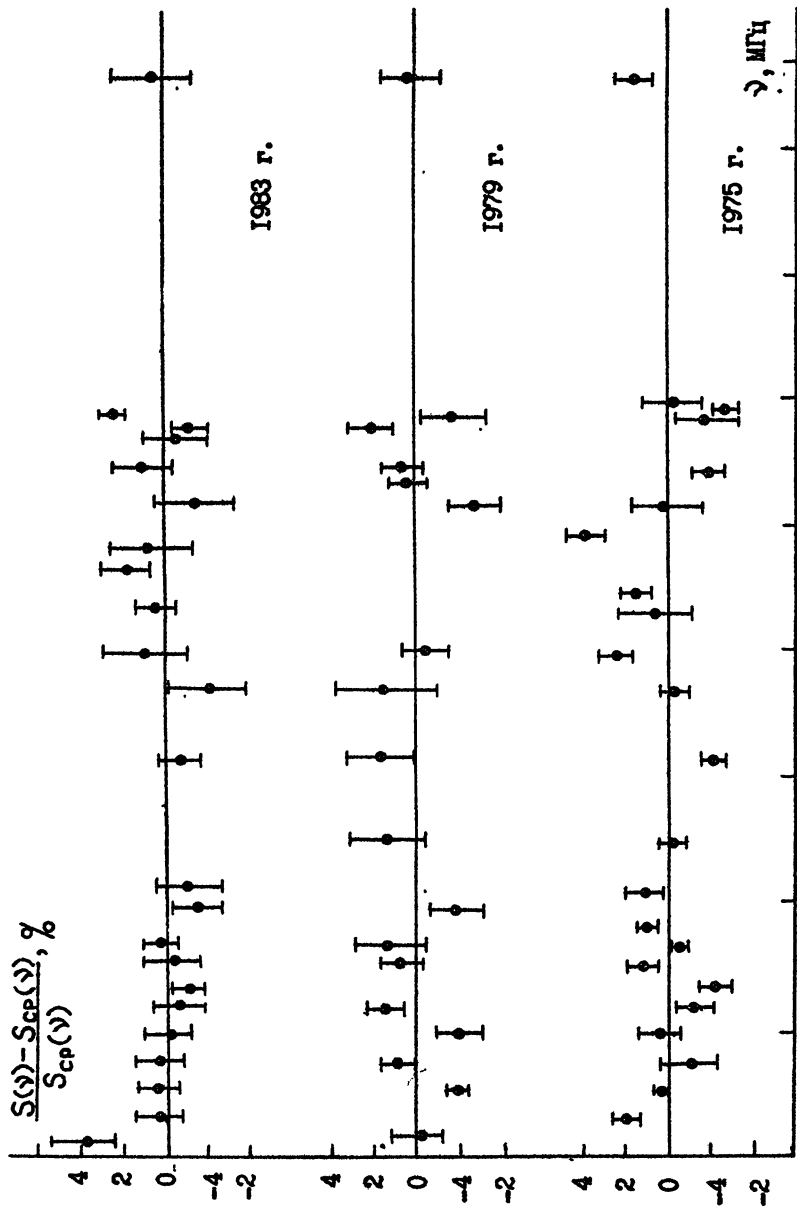


Рис. 1. Относительные отклонения измеренных значений потока от средних спектров (в процентах) по данным 1975, 1979 и 1983 гг.

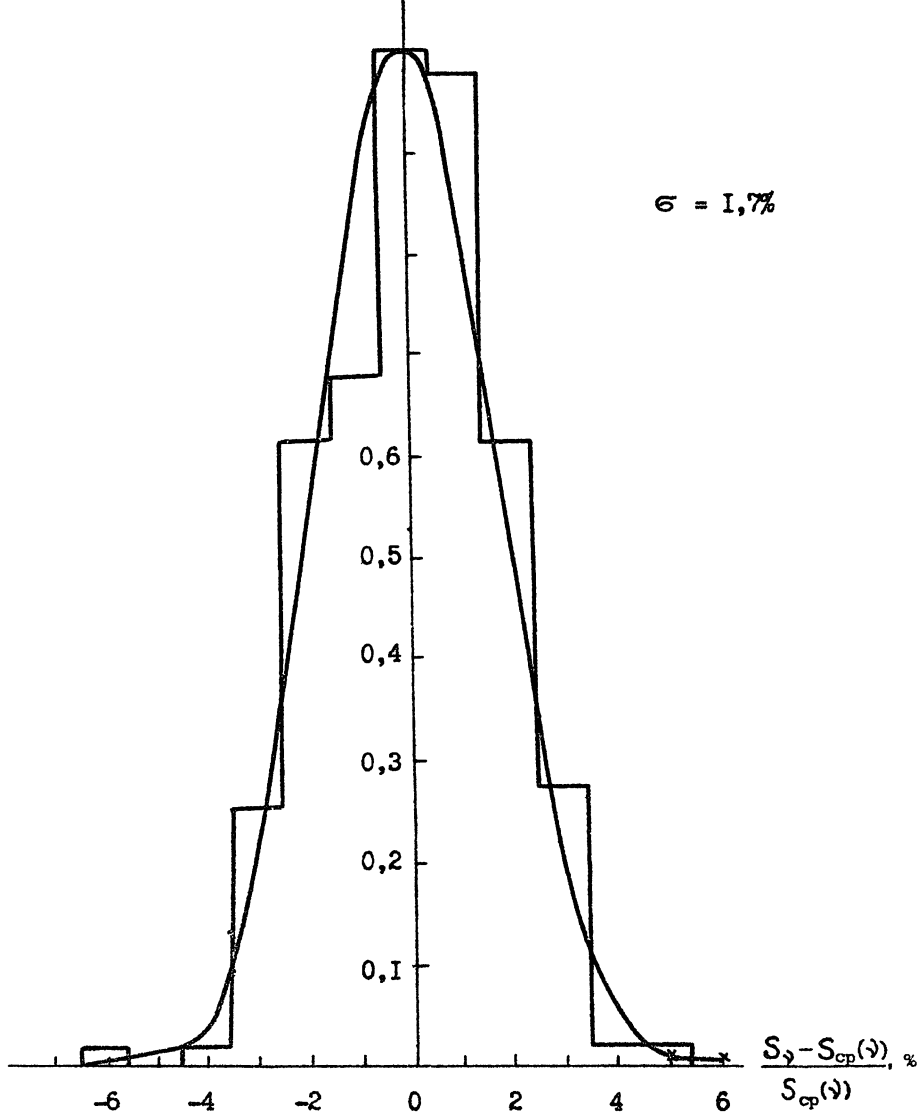


Рис. 2. Гистограмма относительных отклонений измеренных значений потока от средних спектров по всей совокупности данных

воляет точно определить наклон спектра α , средняя величина ошибки равна $\Delta\alpha = \pm 0,0045$ или $\Delta\alpha / \alpha = 0,55\%$.

В отдельных случаях в спектре Кассиопеи-А в диапазоне 3–4 ГГц наблюдались временные локальные возмущения с амплитудой, достигающей 20% /2I/. Эти всплески интерпретированы как радиоизлучение крупной конденсации в период её активности, и тогда спектральный индекс радиоизлучения оболочки вычислялся только по невозмущённому спектру. Такой чистке подверглись спектры 1971 и 1973 годов.

Отклонения измеренных величин потоков $S(\nu)$ на всех частотах от среднего спектра $S_{cp}(\nu)$, вычисленного для каждой эпохи по данным табл. I, характеризуют графики, представляющие зависимость $(S(\nu) - S_{cp}(\nu)) / S_{cp}(\nu)$ от $\lg \nu$. Примеры отклонений приведены на рис. 1 для спектров 1975, 1979 и 1983 годов. На рис. 2 нанесена гистограмма таких отклонений, включающая 244 отсчёта по всей совокупности данных, полученных за 17 лет в период с 1967 по 1984 г. Гистограмма аппроксимирована кривой нормального распределения, имеющей дисперсию $\sigma_x = 1,7\%$. Дисперсия σ_x представляет собой случайную ошибку абсолютных измерений, характерную для данной методики и места измерений. Таким образом суммарная случайная среднеквадратичная ошибка наших абсолютных измерений на одной частоте составляет в среднем $\sigma_{cl} = 2\%$.

В общем случае измеряемая любым методом плотность потока радиоизлучения источника является функционалом $S_\nu(t_p, t_n, t_A, t_3, t_n)$, содержащим многие случайные поля с совершенно различными характерными временами t . Как отмечалось выше, в число их входят: флуктуационные процессы в радиометре $n(t_p)$, поля скрытых помех $n(t_n)$, случайные поля метеопараметров атмосферы $G_\infty(t_A)$, $\gamma(t'_A)$, случайные поля в радиоизлучении подстилающей поверхности (земли вокруг антенны) $n(t_3)$ и, наконец, процессы, связанные с переменностью излучения самого источника t_n . Для получения истинного среднего $\overline{S_\nu(t_p, t_n, t_A, t_3, t_n)}$ усреднение по времени проводится по большому интервалу $t \rightarrow \infty$ или хотя бы должно выполняться условие $t_p, t_n, t_A, t_3 < t < t_n$, что практически невозможно осуществить. Поэтому измеренные за 20–25 циклов величины плотностей потоков могут отличаться от истинных на величину случайной ошибки σ_x . В нашем случае σ_{cl} была минимальна, поскольку за весь 17-летний период измерения проводились в одни и те же летние месяцы при близких устойчивых погодных условиях, и по порядку величины она близка к дисперсии флуктуаций усиления антенны. Дисперсия порядка $\sigma_x = 1,7\%$, по-видимому, определяет предельную точность абсолютных из-

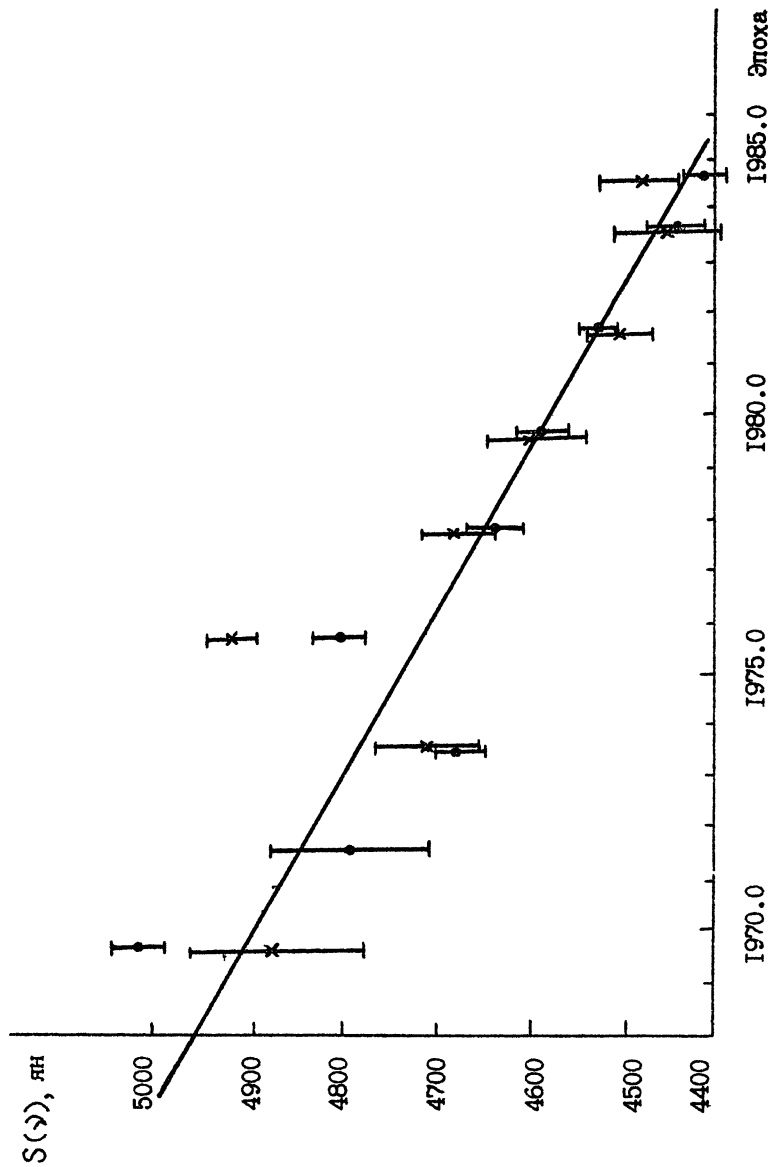


Рис. 3. Поток на частоте 650 МГц в зависимости от эпохи измерений
(x x x - непосредственные измерения, •••• - вычисленные по спектру значения $S_{\text{ср}}(\lambda)$)

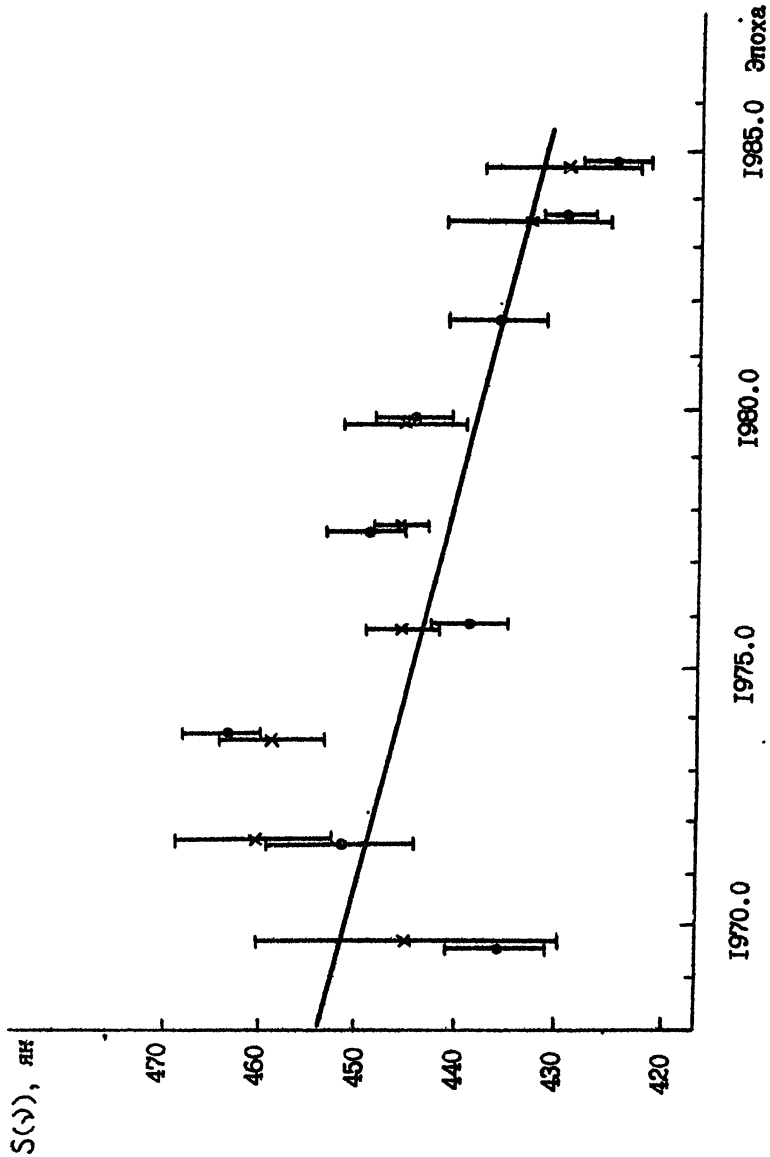


Рис. 4. Погоня на частоте 9770 МГц в зависимости от эпохи измерений
 (х х х - непосредственные измерения, . . . - вычисленные по спектру значения $S_{\text{ср}}$ (o))

мерений, выполненных любым методом. Вместе с систематической ошибкой средняя по спектру среднеквадратичная ошибка абсолютных измерений потока на каждой из частот составляет около 3%. Поскольку измерительный комплекс не изменялся, то систематические ошибки оставались одинаковыми. Поэтому в дальнейшем при сопоставлении результатов, относящихся к различным эпохам, будем принимать во внимание только случайные ошибки.

На рис. 3 и 4 нанесены измеренные плотности потоков на крайних частотах исследуемого диапазона, 550 и 9770 МГц, в зависимости от эпохи, а также потоки, вычисленные для этих частот по среднему спектру, используя параметры, приведенные в табл. I. Из графиков видно, что для нахождения средней скорости убывания потока на каждой из частот, можно воспользоваться линейной зависимостью $\lg S(\nu)$ от времени t . Найденные методом наименьших квадратов средние скорости убывания потока $\Omega(\nu) = (1/S(\nu)) (dS(\nu)/dt)$ приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Частота, МГц	:По измеренным потокам		:По вычисленным потокам		Временной интервал
	$\Omega(\nu)\%$	год ⁻¹	$\Omega(\nu)\%$	год ⁻¹	
550	- 0,68 ± 0,12		- 0,75 ± 0,08		1969-1984
9770	- 0,39 ± 0,11		- 0,30 ± 0,15		1969-1984

Пример хорошо иллюстрирует частотную зависимость скорости убывания потока: на двух частотах они существенно отличаются. В /23/ было показано в общем виде, что если имеет место частотная зависимость $\Omega(\nu)$, то спектральный индекс α должен зависеть от времени, и

$$\frac{d\alpha}{dt} = - \frac{\Omega(\nu_1) - \Omega(\nu_2)}{\ln \nu_1 - \ln \nu_2} \quad (6)$$

В рассматриваемом временном интервале средняя скорость убывания спектрального индекса составила $d\alpha/dt = - 1,56 \cdot 10^{-3}$ год⁻¹ и относительное годовое уменьшение равно $(1/\alpha)(d\alpha/dt) = 1,92 \cdot 10^{-3} \approx 0,2\%$.

Скорость изменения спектрального индекса и потока можно найти непосредственно по экспериментальным данным, приведенным в табл. I. Величины α и β имеют общую тенденцию к убыванию со временем. Для нахождения средней скорости изменения потока $S(\nu)$ и показателя спектра α ограничимся линейным приближением в виде

$$\alpha = \alpha_0 - \alpha(t - t_0), \quad \beta = \beta_0 - \beta(t - t_0) \quad (7)$$

По данным табл. I найдём методом наименьших квадратов величины, входящие в (7): $\alpha_0 = 0,832$; $a = 1,584 \cdot 10^{-3}$; $b_0 = 3,9747$; $b = 7,61 \cdot 10^{-3}$, где t - время в годах, $t_0 = 1969.6$. Подставляя (7) в (5), получим выражение, описывающее эволюцию среднего спектра радиоизлучения Кассиопеи-A:

$$\lg S(\nu) = B_0 - \alpha_0 \lg \nu - (b - a \lg \nu)(t - t_0). \quad (8)$$

Среднюю скорость уменьшения потока на частоте ν удобно представить в виде

$$\frac{1}{S(\nu)} \frac{dS(\nu)}{dt} = \Omega(\nu) = -2,3b - a \ln \nu; \quad (9)$$

на современную эпоху эта величина равна

$$\underline{\Omega}(\nu) = - (17,524 - 1,584 \ln \nu) \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}, \quad (10)$$

где ν в МГц; средняя скорость уменьшения спектрального индекса равна $d\alpha/dt = -a = -1,584 \cdot 10^{-3}$. Частотная зависимость вида (10) получена ранее в ряде работ [11, 22, 23, 25]; соответствующие параметры приведены в табл. 3, они незначительно отличаются друг от друга.

Т а б л и ц а 3

$-\frac{d\alpha}{dt}$:	2,3b	$\Omega(\nu) \% \text{ год}^{-1}$					Литература
			:550МГц:	960МГц:	1420МГц:	3000МГц:	9770МГц:	
$1,260 \cdot 10^{-3}$:	$18,40 \cdot 10^{-3}$	1,045	0,975	0,925	0,830	0,680	/11/
$1,203 \cdot 10^{-3}$:	$18,20 \cdot 10^{-3}$	1,060	0,994	0,947	0,857	0,715	/22/
$1,250 \cdot 10^{-3}$:	$18,98 \cdot 10^{-3}$	1,110	1,040	0,990	0,897	0,750	/23/
$1,300 \cdot 10^{-3}$:	$18,70 \cdot 10^{-3}$	1,050	0,977	0,926	0,830	0,676	/25/
$1,584 \cdot 10^{-3}$:	$17,50 \cdot 10^{-3}$	0,750	0,660	0,600	0,480	0,300	/Н.Р./

В нашей работе частотная зависимость (10) охватывает интервал времени 1969.6 - 1984.6, характеризуется большой скоростью убывания спектрального индекса, а сами величины $\Omega(\nu)$, как видно из табл.3, существенно меньше, чем в упомянутых более ранних работах. В [14] уже отмечалось, что на частоте 960 МГц средние скорости уменьшения потока были в 2,2 раза меньше в интервале 1972.3 - 1981.4, чем в интервале 1964.2 - 1972.3 гг. Эти факты свидетельствуют о неравномерно-

сти уменьшения интенсивности Кассиопей-А во времени. Для сравнения в табл. 4 собраны опубликованные экспериментальные данные о величинах $\Omega(\gamma)$ для различных эпох и частот. В диапазоне 0,5 - 10 ГГц большинство данных группируются около четырех частот: 960, 1420, 3000 и 9770 МГц и их можно сравнить с результатами настоящей работы, представленными в табл. 3. Для этого отберём из табл. 4 только те работы, в которых конечная эпоха измерений близка к эпохе 1969.6.

Т а б л и ц а 4

Частота, МГц	Начало наблюдений	Конец наблюдений	$\Omega = \frac{1}{S(\gamma)} \frac{dS(\gamma)}{dt}, \%$	Литература
81,5	1949.0	1960.9	$1,06 \pm 0,14$	/2/
1400	1960.5	1960.7	$0,90 \pm 2,30$	/3/
3200	1953.9	1962.7	$1,14 \pm 0,26$	/4/
9375	1961.7	1963.7	1,7	/5/
1440	1960.3	1964.2	$1,75 \pm 0,52$	/6/
81,5	1949.0	1969.4	$1,29 \pm 0,08$	/7/
1420	1956.8	1971.6	$0,89 \pm 0,12$	/8/
3000	1961.0	1971.5	$0,92 \pm 0,15$	/8/
9375	1961	1971	$0,63 \pm 0,12$	/9/
3060	1961	1971	$1,04 \pm 0,21$	/9/
960	1964.2	1972.3	$0,85 \pm 0,05$	/10/
600 + 860	1964	1971	$0,70 \pm 0,80$	/9/
8000	1962.8	1973.7	$0,70 \pm 0,07$	/11/
927	1962.8	1977.85	$0,94 \pm 0,04$	/12/
2924	1962.7	1979.9	$0,80 \pm 0,07$	/13/
960	1972.3	1981.4	$0,413 \pm 0,08$	/14/
152	1968.9	1980.8	$1,10 \pm 0,20$	/15/
1440	1960.3	1971.6	$1,38 \pm 0,15$	/16/
81,5	1949.0	1980.5	$1,29 \pm 0,06$	/15/

Результаты сравнения сведены в табл. 5, из которой видно, что в рассматриваемых временных интервалах средняя скорость изменения потока Кассиопей-А на всех частотах имеет общую тенденцию к уменьшению с течением времени; на современную эпоху все величины $\Omega(\gamma)$ уменьшились в среднем на $\Delta\Omega(\gamma) \approx 0,3\% \text{ год}^{-1}$.

В /23/ было показано, что при синхротронном механизме излучения скорость падения потока у остатков сверхновых представляется как сум-

ма двух членов :

$$\Omega(\nu) = - (2I,3 - \ln \nu) \frac{d\alpha}{dt} + \frac{1}{S} \left(\frac{dS}{dt} \right)_R, \quad (II)$$

где первый член описывает изменения энергетического спектра релятивистских электронов, а второй - потери на расширение: $\frac{1}{S} \left(\frac{dS}{dt} \right)_R = A(\alpha) \frac{v}{R}$, где $A(\alpha)$ - постоянный множитель, зависящий от α ; v , R - скорость расширения и радиус остатка сверхновой.

Т а б л и ц а 5

Частота МГц	Начальная эпоха	Конечная эпоха	$\Omega(\nu)\% \text{ год}^{-1}$	$\Omega(\nu)\% \text{ год}^{-1}$	$\Omega(\nu)\% \text{ год}^{-1}$
960	1964.2	1972.3	0,92 /14/	0,66 /н.р./	0,26
1420	1956.8	1971.6	0,89 /8/	0,60 /н.р./	0,29
3000	1961.0	1971.6	0,92 /8/	0,48 /н.р./	0,44
9770	1961.6	1971.6	0,63 /9/	0,30 /н.р./	0,33

Потери на расширение составили на эпохи 1961-1975 годов $\frac{1}{S} \left(\frac{dS}{dt} \right)_R = -0,9\% \text{ год}^{-1} /23/$ и на эпохи 1969 - 1984 годов $\frac{1}{S} \left(\frac{dS}{dt} \right)_R = -0,57\% \text{ год}^{-1}$, что означает замедление скорости расширения туманности за последние 15 лет почти в 1,6 раза. Таким образом, если имеет место эффект уменьшения средней скорости падения потока в современную эпоху, то это бы означало сильное торможение оболочки при расширении в межзвёздной среде. Хотя непосредственные экспериментальные данные, приведённые выше, говорят об этом, мы утверждаем, что этот эффект кажущийся и связан с наблюдательной селекцией, т.е., прежде всего, с недостаточностью частоты и числа проведённых измерений, в особенности в эпохи до 1977 года.

Величина $\Omega(\nu)$, определённая даже за длительный промежуток времени (в нашей работе 15 лет), сильно зависит от выбора начальной и конечной эпох. На рис. 3 и 4 виден разброс потоков на частотах 550 и 9770 МГц относительно средних прямых. Следует подчеркнуть, что разброс данных вызван не ошибками измерений: точность определения параметров спектра α и β (табл. I) почти всюду достаточна для нахождения потоков на любой частоте со случайной ошибкой $\leq 1\%$. Так, на 550 МГц погрешности составляют 0,5% и на 9770 МГц - 0,9%, в то же время отклонения достигают $\pm 1,7$ и $\pm 3,7\%$ на каждой из частот соответственно, т.е. более 3 σ . Подобная ситуация имеет место и на дру-

гих частотах, при этом отклонения для более ранних эпох были большими. Следствием быстрых изменений потока является переменность $\Omega(\dot{\nu})$ и её зависимость от начальной и конечной эпох измерений и длительности интервала между ними. Так, за двухлетний период в зависимости от начальной эпохи средняя скорость на частоте 550 МГц менялась $-2,43\% \leq \Omega(550) \leq 0,64\%$, еще большие вариации имели место на частоте 9770 МГц $-2,8\% \leq \Omega(9770) \leq \Omega 1,8\%$, т.е. при некоторых временных интервалах потоки нарастали со временем. Табл. 6 даёт представление о вариациях $\Omega(550)$ и $\Omega(9770)$, вычисленных по двум измерениям с промежутком 10 лет, в зависимости от начальной эпохи.

Т а б л и ц а 6

Начальная эпоха	$\Omega(550)\% \text{ год}^{-1}$	$\Omega(9770)\% \text{ год}^{-1}$
1969.6	- 0,91	+ 0,18
1971.6	- 0,56	- 0,34
1973.6	- 0,66	- 0,75
1975.7	- 0,93	- 0,35

Наряду с вековым уменьшением спектрального индекса (7), еще ранее были отмечены его временные вариации /9, 19, 22, 27/. Распределение спектральных индексов в период с 1969.6 по 1984.6 представлено на рис. 5, где $\bar{\alpha}$ - его среднее значение за последние 8 лет (1977 - 1984 гг.). Отклонения α достигают 4,5% при погрешности отдельного измерения $\Delta\alpha/\alpha = 0,5\%$. Поэтому нужно считать, что быстрые и значительные изменения наблюдаемых спектров являются свойством излучения источника Кассиопеи-А.

Из приведённых примеров следует, что для исследования эволюции спектра радиоизлучения Кассиопеи-А необходимо иметь картину распределения потоков и спектров во времени, при этом даже двухлетний интервал между измерениями оказывается большим. Воссоздать полную картину оказалось возможным, привлекая данные всех опубликованных относительных и абсолютных измерений, начиная с 1953 года /18/. Изложение полученных результатов будет сделано в следующей нашей работе (П). Коротко они сводятся к следующему. Эволюция спектра радиоизлучения Кассиопеи-А за всю историю наблюдений описывается зависимостью параметров $\alpha(t)$ и $B(t)$ от времени в виде периодических затухающих колебаний с периодом 6 лет :

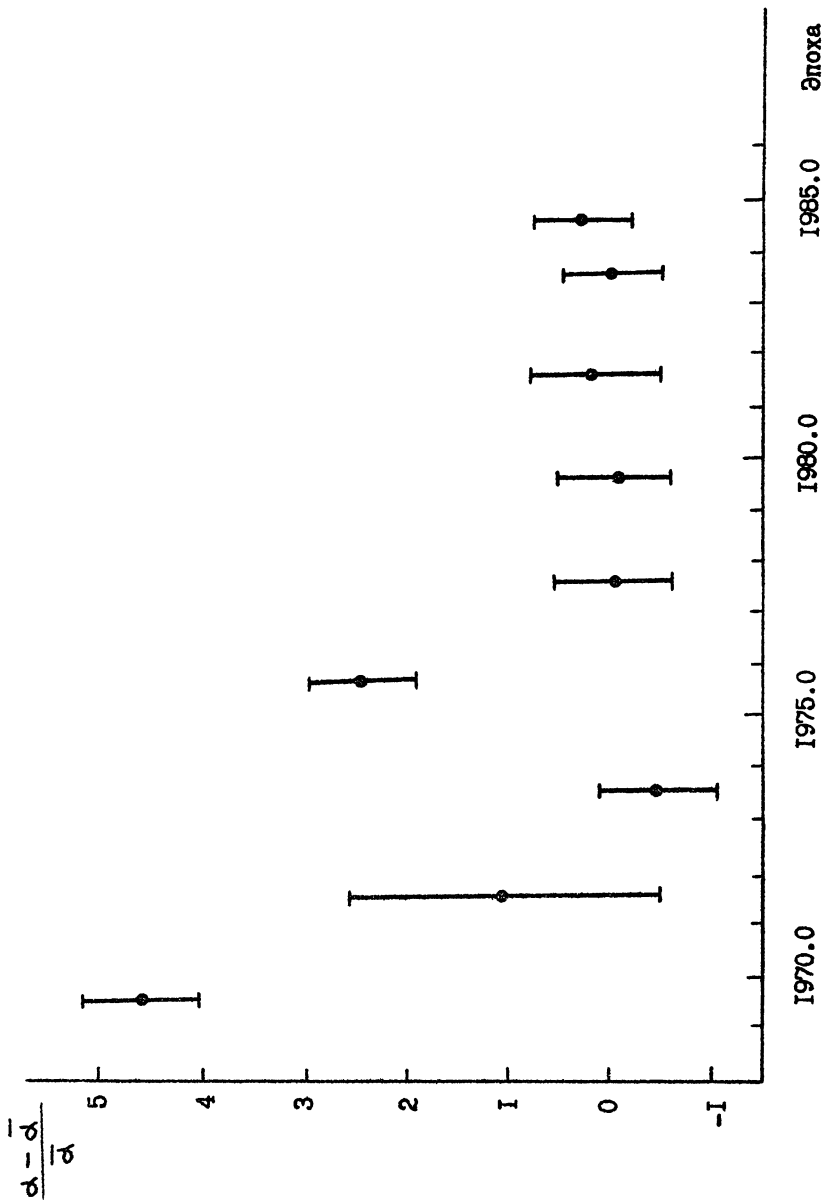


Рис. 5. Относительные отклонения спектрального индекса α от среднего за 1977 - 1984 г. значения $\bar{\alpha}$ в процентах в зависимости от эпохи измерений

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= 0,8123 - [0,00081 + 0,00227 \cos(60t)^\circ] t, \\ \beta(t) &= 5,8799 - [0,0051 + 0,0075 \cos(60t)^\circ] t, \end{aligned} \quad (12)$$

где t - время, измеряемое в годах, $t = 0$ на эпоху 1981.8. Оба параметра в среднем линейно убывают со скоростью

$$\frac{d\alpha}{dt} = -8,1 \cdot 10^{-4} \quad \text{и} \quad \frac{d\beta}{dt} = -5,1 \cdot 10^{-3}. \quad (13)$$

Вековое уменьшение потока при этом также неравномерно. Среднее убывание потока за весь наблюдательный период представляется частотной зависимостью вида

$$Q(\nu) = \frac{1}{S_\nu} \frac{dS_\nu}{dt} = -8,1 \cdot 10^{-4} (14,5 - \ln \nu), \quad (14)$$

где ν в МГц.

Приведённые выше экспериментальные данные, содержащиеся в табл. I и I-7 приложения, по существу, представляют собой выборку из зависимости (12) на соответствующую эпоху и находятся в хорошем численном соответствии.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Т а б л и ц а I

Спектр 1973 г.

Частота ν , МГц	Поток $S(\nu)$, ян	Ошибка σS , %	Частота ν , МГц	Поток $S(\nu)$, ян	Ошибка σS , %
510	4990	2,5	1800	1820	0,7
550	4711	1,1	2000	1621	0,6
600	4431	1,2	2247	1549	1,0
650	4249	0,81	2250	1493	0,4
705	3885	0,9	2490	1415	0,8
750	3673	1,5	2800	1268	0,8
795	3550	1,0	3026	1174	1,2
900	3212	1,25	3338	1120	1,2
950	3043	2,2	3872	994	1,6
1050	2732	0,7	9933	452,5	1,31
1200	2525	0,9			
1500	2185	0,6			

Спектр 1975 г.

Частота ν , МГц	Поток $S(\nu)$, ян	Ошибка σS , %	Частота ν , МГц	Поток $S(\nu)$, ян	Ошибка σS , %
545,5	4958	0,65	1803	1784	0,56
601,7	4478,5	0,40	2000	1680	0,60
649,5	4146	1,60	2250	1500	1,80
703	3940	1,00	2397	1435	0,62
750	3673	1,00	2800	1281	0,90
801	3445	0,68	3027	1165	1,40
856	3363	0,80	3338	1053	0,70
900,5	3177	0,40	3599	980	0,70
950	3079	0,40	3857	933,5	1,40
1045	2784,5	0,89	3983	923,5	1,40
1200	2510	0,50	9765	445,6	0,80
1500	2043	0,49			

Спектр 1977 г.

514	4844	0,9	1999	1577	0,4
550	4677	0,8	2252	1471,5	1,3
600	4405	0,7	2491	1360	1,4
650	4138	0,6	2800	1250	0,9
703	3757	0,6	3025	1191	1,6
750	3680	0,7	3350	1085	1,2
800	3330	0,5	3600	1034,6	2,3
850	3215	0,3	3714	963	1,4
900	3109	0,4	3850	972	0,9
985	2875	0,6	9610	447	0,7
1799	1762	0,4			

Спектр 1979 г.

Частота : Δ, МГц	Поток : S(Δ), ян	Ошибка : GS, %	:	Частота : Δ, МГц	Поток : S(Δ), ян	Ошибка : GS, %
548	4604	1,1	:	1500	2066,5	1,7
595	4229	0,4	:	1803	1775	2,4
650	4044	0,7	:	2000	1597	0,75
703	3698	1,2	:	2250	1465	0,8
752	3607,5	1,0	:	3027	1117	1,1
850	3249	0,9	:	3351	1064,5	1,0
900	3114	1,6	:	3719	993	1,0
984	2822,5	1,2	:	3850	929	1,3
1199	2467	1,6	:	9770	445,5	1,4

Спектр 1981 г.

515	4817	1,0	:	1203	2364	1,4
550	4510	0,8	:	1498	2057	1,5
598	4312	1,1	:	1795	1694	1,2
650	3911	1,1	:	1998,5	1594	1,4
701	3725	1,1	:	2250	1428	1,4
754,5	3510	0,6	:	2500	1324	1,5
800	3291	1,0	:	2818	1182	1,2
850,5	3103	1,1	:	3026	1130	1,5
895	3098	2,0	:	3300	1064	0,9
931	2954	0,7	:	3747	930	0,8
1043	2755	1,3	:	3852	965	0,9

Спектр 1983 г.

Частота : ν, МГц :	Поток : S (ν), ян :	Ошибка : ε S, % :	Частота : ν, МГц :	Поток : S (ν), ян :	Ошибка : ε S, % :
511	4908	1,5	1800	1662	1,9
550	4463	1,1	2000	1572	2,0
600	4166	1,0	2250	1423	1,0
651	3893	1,1	2500	1325	1,1
704	3633	1,0	2801	1193	1,9
752	3420	1,2	3026	1097	2,0
799	3246	0,7	3300	1049	1,5
850	3112	1,4	3600	961	1,6
899	2995	0,6	3714	929	0,8
991	2703	1,2	3850	938	0,6
1050	2596	1,7	9770	433	1,8
1500	1952	1,0			

Т а б л и ц а 7

Спектр 1984 г.

512	4720	1,1	2000	1517	1,3
550	4492	1,0	2250	1403	0,8
601	4206	2,0	2500	1261	1,3
650	3879	1,1	2760	1158	0,8
703	3590	0,8	3025	1123	1,2
750,5	3398	0,9	3300	1024	0,9
800	3257	0,7	3540	993	0,9
850	3065	0,8	3725	950	0,9
900	2967	1,2	9770	426	1,8
961	2793	0,9			

Литература

- I. Шкловский И.С.-Астрон.ж. 1960,37,256.
2. Högbom J.A., Shakeshaft J.R. - Nature, 1961, v.189, 4764, 561.
3. Heesch D.S., Meredith B.L. - Nature, 1961, v.190, 4777, 705.
4. Mayer C.H., McCullough T.P., Sloanaker R.M. and Haddock F.T. - Astrophys.J., 1965, v.141, 3, 867.
5. Ласточкин В.П., Станкевич К.С.-Астрон.ж., 1964,41,4,769.
6. Findlay J.W., Hvatum H., Waltman W.B. - Astrophys.J., 1965, v.141, 3, 873.
7. Scott P.F., Shakeshaft J.R., Smith M.A. - Nature, 1969, v.223, 5211, 1139.
8. Baars J.W.M. and Hartsuijker A.P. - Astron.Astrophys., 1972, v.17, 2, 172.
9. Станкевич К.С., Иванов В.П., Педьшенко С.А., Торхов В.А., Иванникова А.Н.-Изв.ВУЗов - Радиофизика, 1973, 16, 5, 786.
10. Станкевич К.С., Иванов В.П., Торхов В.П. Астрон.ж., 1973, 50, 3, 645.
- II. Dent W.A., Aller H.D., Olsen E.T. - Astrophys.J., 1974, v.188, 1, L11.
12. Виняикин Е.Н., Разин В.А.-Астрон.ж., 1979, 56, 5, 913.
13. Виняикин Е.Н., Разин В.А., Хрулёв В.В.-Письма в АЖ, 1980, 10, 620.
14. Иванов В.П., Бубукин И.Т., Станкевич К.С.-Письма в АЖ, 1982, 8, 2, 83.
15. Агафонов М.И., Станкевич К.С.-Письма в АЖ, 1981, 7, 10, 612.
16. Findlay J.W. - Astrophys.J., 1972, v.174, 3, 527.
17. Иванов В.П., Станкевич К.С. Тезисы докладов XV Всесоюзной конференции по радиоастрономии, Харьков, 1983, с. 134.
18. Иванов В.П., Станкевич К.С. Тезисы докладов XV Всесоюзной конференции по радиоастрономии, Харьков, 1983, с. 135.
19. Барабанов А.П., Горячева Т.К., Иванов В.П., Станкевич К.С., Столяров С.П. Тезисы докладов XV Всесоюзной конференции по радиоастрономии Харьков, 1983, с. 136.

20. Станкевич К.С.—Радиотехника и электроника, 1973, 18, 4, 717.
21. Барабанов А.П., Иванов В.П., Станкевич К.С., Торхов В.А.—Письма в АЖ, 1977, 3, 7, 302.
22. Барабанов А.П., Иванов В.П., Станкевич К.С., Торхов В.А. Тезисы докладов IX Всесоюзной конференции по радиоастрономии, Харьков, 1976, с. 76.
23. Станкевич К.С.—Письма в АЖ, 1977, 3, 8, 349.
24. Stankevich K.S. - Aust.J.Phys., 1979, v.32, 95.
25. Vaars J.W.M., Genzel R., Pauliny-Toth I.I.K., Witzel A. - Astron.Astrophys., 1977, v.61, 1, 99.
26. Бондарь Л.Н., Зелинская М.Р., Каменская С.А., Порфирьев В.А., Рахлин В.Д., Родина В.М., Станкевич К.С., Стрежнева К.М., Троицкий В.С.—Изв.ВУЗов - Радиофизика, 1969, 12, 6, 807.
27. Троицкий В.С., Станкевич К.С., Цейтлин Н.М., Кротиков В.Д., Бондарь Л.Н., Стрежнева К.М., Рахлин В.Д., Иванов В.П., Пелюшенко С.А., Зубов М.М., Самойлов Р.А., Титов Г.К., Порфирьев В.А., Чекалёв С.П.—Астрон.ж., 1971, 48, 6, 1150.
28. Кротиков В.Д., Порфирьев В.А., Троицкий В.С.—Изв.ВУЗов-Радиофизика, 1961, 4, 6, 1004.
29. Иванов В.П., Станкевич К.С.—Изв.ВУЗов-Радиофизика, 1986, 29, №1.
30. Иванов В.П., Станкевич К.С. Препринт НИРФИ №183, Горький, 1984.

Дата поступления статьи
24 января 1986 г.

Алексей Петрович Барабанов
Валерий Павлович Иванов
Казимир Станиславович Станкевич

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
И ЭВОЛЮЦИЯ СПЕКТРА ОСТАТКА СВЕРХНОВОЙ
КАССИОПЕЙ-А. 1.

Подписано к печати 13.05.86 г. МЦ 00824. Формат 60x84/16.
Бумага множительная. Печать офсетная. Объем 1,57 усл. п.л.
Заказ 4371. Тираж 120. Бесплатно.

Отпечатано на ротационте Н И Р Ф И