

УДК 524.7-77

А. В. Мень¹, С. Я. Брауде¹, С. Л. Рашковский¹, Н. К. Шарыкин¹,
В. А. Шепелев¹, Г. А. Инютин¹, Р. В. Ващишин¹,
А. И. Браженко², В. Г. Булацен², В. В. Кошевой³, А. Б. Лозинский³

¹Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины,
61002, Харьков ГСП, Червонопрапорна 4

²Гравиметрическая обсерватория Института геофизики Национальной академии наук Украины,
36029, Полтава, Мясоедова 27/29

³Физико-механический Институт Национальной академии наук Украины,
79053, Львов ГСП, Научная 5

Радиоинтерферометрические наблюдения квазара 3С 216 на декаметровых волнах

Приводятся результаты исследования угловой структуры радиоизлучения квазара 3С 216 в декаметровом диапазоне волн с помощью трех радиоинтерферометров системы УРАН с базами 42.3 км, 152.3 км и 946.2 км. Показано, что в этом диапазоне радиоизображение этого объекта существенно отличается от результатов наблюдений на СВЧ. Определены наиболее вероятные простейшие модели распределения радиояркости квазара на частотах 25 и 20 МГц, состоящие из двух компонентов — компактного с размером от 1.7" до 2.4" и протяженного с размером около 21", центры которых практически совпадают (модель «ядро—гало»). Поток излучения на этих частотах компактного компонента $(0.61—0.63)S_0$ и протяженного $(0.39—0.37)S_0$, где S_0 — спектральная плотность полного излучения квазара.

РАДІОІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ КВАЗАРА 3С 216 НА ДЕКАМЕТРОВИХ ХВИЛЯХ, Мень А. В., Брауде С. Я., Рашковський С. Л., Шарикін М. К., Шепелєв В. О., Інютін Г. А., Ващишин Р. В., Браженко А. І., Булацен В. Г., Кошовий В. В., Лозинський А. Б. — Приводяться результати досліджень кутової структури радіовипромінювання квазара 3С 216 в декаметровому діапазоні хвиль з допомогою трьох радіоінтерферометрів системи УРАН з базами 42.3 км, 152.3 км та 946.2 км. Показано, що в цьому діапазоні радіозображення цього об'єкту суттєво відрізняється від результатів спостережень на НВЧ. Визначені найбільш вірогідні найпростіші моделі розподілення радіояскравості квазара на частотах 25 і 20 МГц, які складаються з двох компонентів — компактного з розміром від 1.7" до 2.4" та протяжного, з розміром біля 21", центри яких практично збігаються (модель «ядро—гало»). Потіки випромінювання на цих частотах компактного компонента $(0.61—$

$0.63)S_0$ і протяжного $(0.39—0.37)S_0$, де S_0 — спектральна щільність повного випромінювання квазара.

INTERFEROMETER OBSERVATIONS OF THE QUASAR 3C216 AT THE DECAMETER WAVELENGTHS, by Megn A. V., Braude S. Ya., Rashkovskiy S. L., Sharykin N. K., Shepelev V. A., Inyutin G. A., Vashishin R. V., Brazhenko A. I., Bulatsen V. G., Koshovyi V. V., Lozinskiy A. B. — The study of the angular structure of the quasar 3C216 with the URAN interferometers (baselines of 42.3 km, 152.3 km, and 946.2 km) at the decameter wavelengths is presented. The source radio image in this range is shown to be essentially different from that at higher frequencies. The most suitable simple models of radio brightness distribution at frequencies of 20 and 25 MHz were determined. They consist of two practically co-centered components (core-halo model): a compact feature with dimensions from 1.7" to 2.4" and an extended one with diameter of about 21". Their flux densities at these frequencies are $(0.61—0.63)S_0$ for the compact component and $(0.39—0.37)S_0$ for the extended one, S_0 being the total flux density of the quasar.

ВВЕДЕНИЕ

Угловая структура излучения квазара 3C 216 исследовалась в широком интервале частот от 81.5 до 15000 МГц с помощью радиointерферометров, систем супер- и апертурного синтеза. Наблюдения, проведенные с помощью отдельных интерферометров со сравнительно небольшими базами ($D/\lambda < < 2000...3000$, D — база, λ — длина волны) не позволили определить структуру этого объекта из-за недостаточного углового разрешения [15, 17, 18]. Последующие работы, выполненные с большим разрешением ($D/\lambda > > 5000$), показали, что угловой размер квазара не превышает нескольких угловых секунд [11—14, 24].

В работах [12, 13] при измерениях на частоте 2695 МГц с помощью ряда интерферометров с базами от $D/\lambda = 10000$ до $D/\lambda = 24000$ квазар 3C 216 представлялся состоящим из одной детали с угловым размером $\Delta\theta = = 2.57''$, причем эта модель соответствовала 100 % интенсивности излучения квазара (размеры радиоисточника, как правило, определяются на уровне 50 % интенсивности при гауссовском законе распределения радиояркости). Аналогичные результаты были получены в работе [24] на частотах 408 и 1423 МГц с $D/\lambda = 32640$ и 113841 соответственно.

Детальная информация о структуре радиоизлучения объекта 3C 216 на СВЧ была получена с помощью системы апертурного синтеза VLA с разрешением $0.4''$ на частоте 4885 МГц [20], системы суперсинтеза MERLIN с разрешением $1''$ на частоте 408 МГц, MERLIN и VLA на частотах 1464 и 1666 МГц с разрешением $0.25''$ и VLA на 5000 МГц с разрешением $0.35''$ [22]. Радиоизображение квазара на частоте 4885 МГц оказалось состоящим из трех компонентов: двух компактных — центрального, расположенного вблизи оптического квазара, и северо-восточного, практически неразрешенных, с размерами менее $0.4''—0.5''$ каждый. Их центры разнесены на $0.7''$ при позиционном угле около 40° . Третий, более протяженный юго-западный компонент, имел размер около $1.6''$. Максимальный общий размер всего радиоисточника не более $3.2''$.

Более сложная модель распределения радиояркости этого объекта была получена также при наблюдениях с помощью VLA [23] на частотах 5000, 8000 и 15000 МГц с разрешением от $0.2''$ до $0.6''$. Так, на частоте 8000 МГц модель была определена как четырехкомпонентная, состоящая из трех компактных компонентов А, В, С и одного более протяженного компонента

Д. Компоненты А (ядро), В (северо-восточный) и Д (юго-западный) практически соответствуют модели, приведенной в [20]. Еще один компактный компонент С выделен в северной части компонента Д. Все компактные компоненты имеют угловые размеры от $0.4''$ до $0.6''$. Кроме этих четырех компонентов дополнительные измерения на 8000 МГц с более низким разрешением ($0.6''$) позволили определить также окружающее их диффузное низкояркостное гало с диаметром около $7''$.

Радиоинтерферометрические наблюдения 3С 216 в метровом диапазоне проводились на частотах 81.5 МГц [16] и 86 МГц [5]. Наиболее информативные измерения были выполнены на частоте 81.5 МГц с помощью радиоинтерферометра с базой, изменявшейся от 0.5 км до 1500 км при разных позиционных углах [16]. Этот инструмент состоял из большой Кембриджской антенны с эффективной площадью 36000 м² и передвижной с эффективной площадью около 100 м². На основании измерения зависимости модуля функции видности γ от размеров базы D/λ модель распределения радиояркости 3С 216 на этой частоте была представлена состоящей из двух компонентов — компактного с размером $2.2''$, обеспечивающего 73% общего излучения, и протяженного с размером более одной угловой минуты, ответственного за 27% интенсивности излучения квазара.

Наблюдения на 86 МГц [5] выполнены также с помощью радиоинтерферометра с переменной базой (от 140λ до 5054λ) в основном при расположении, близком к параллели. Они отличались большим разбросом данных из-за низкой точности измерений, не позволяющей сделать какие-либо определенные выводы об угловой структуре радиоизлучения квазара.

В декаметровом диапазоне волн такие наблюдения ранее вообще не проводились, поэтому представляло большой интерес впервые исследовать угловую структуру радиоизлучения квазара 3С 216 методами радиоинтерферометрии на самых длинных волнах, на которых еще возможно вести измерения с поверхности Земли.

РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРЫ, МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Наблюдения велись с помощью трех декаметровых радиоинтерферометров сети УРАН Национальной академии наук Украины с базами 42.3 км (УРАН-1), 152.3 км (УРАН-2) и 946.2 км (УРАН-3) [19]. Базы первых двух интерферометров ориентированы практически вдоль параллели, позиционный угол базы третьего интерферометра — около 77.6° . Интерференционные колебания образовывались путем перемножения сигналов антенны «север—юг» радиотелескопа УТР-2 [9] с сигналами радиотелескопов УРАН, причем первый интерферометр благодаря ретрансляции сигналов с УТР-2 на УРАН-1 работал в режиме реального времени, а остальные — в режиме длиннобазовой интерферометрии с независимой регистрацией сигналов в каждом из пунктов.

Во всех антеннах, используемых в системе, применяется электрический метод управления лучом по двум угловым координатам. Антенна «север—юг» состоит из 1440 линейных горизонтальных широкополосных излучателей, образующих решетку из шести параллельных меридиану рядов. Эффективная площадь этой антенны на частоте 25 МГц при направлении луча в зенит — около 100000 м², размеры — 1846×53 м вдоль меридиана и параллели соответственно. Антенны радиотелескопов УРАН представляют собой однотипные антенные решетки, ориентированные вдоль параллели и состоящие из 96 (УРАН-1) и 256 (УРАН-2 и УРАН-3) широкополосных турникетных излучателей, расположенных под углом $\pm 45^\circ$ к меридиану. Возможность принимать этими инструментами одновременно две линейно

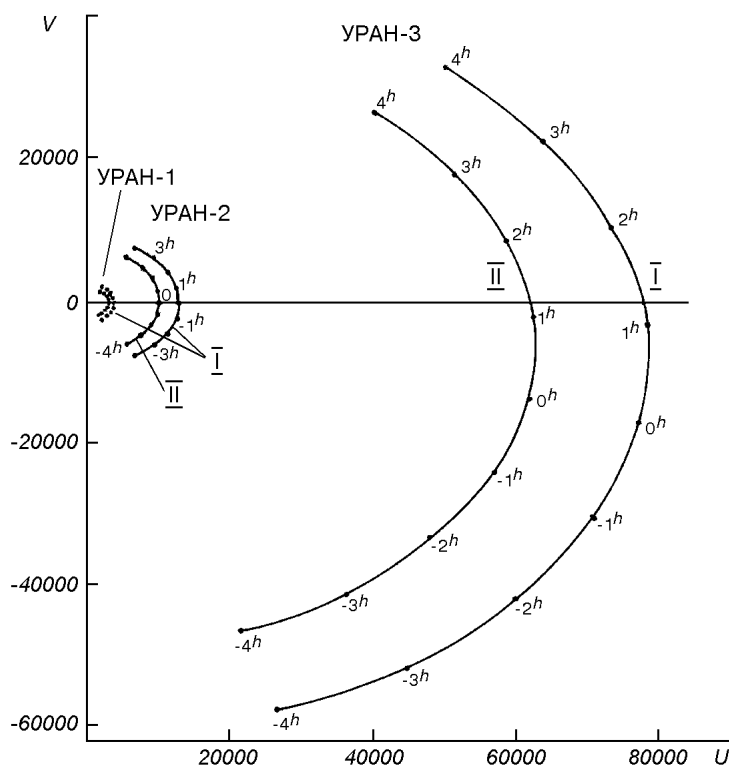


Рис. 1. Пространственные частоты распределения радиояркости 3С216 на UV-плоскости при наблюдениях на радиоинтерферометрах УРАН. Кривые I — для частоты 25, II — 20 МГц. Точками на кривых отмечены часовые углы

поляризованные составляющие сигналов позволила учесть влияние на интерферометрические наблюдения эффекта фарадеевского вращения плоскости поляризации в межпланетной плазме и ионосфере Земли.

Эффективные площади решеток на частоте 25 МГц для каждой из двух линейных поляризаций при ориентировке луча в зенит составляют 5000 м² (УРАН-1) и 14000 м² (УРАН-2 и УРАН-3), размеры первой антенны — 193 × 28 м и остальных — 238 × 59 м вдоль параллели и меридиана соответственно.

Пространственные частоты распределения радиояркости 3С 216 на UV-плоскости (рис. 1), воспроизводимые интерферометрами УРАН, определяются соотношениями

$$U_1 = \frac{42276.7}{\lambda} \cos(T_0 - 2.2^\circ), \quad V_1 = \frac{28886.4}{\lambda} \sin(T_0 - 2.2^\circ) - \frac{1024.8}{\lambda} \quad (1)$$

для УРАН-1,

$$U_2 = \frac{152292.6}{\lambda} \cos(T_0 + 0.38^\circ), \quad V_2 = \frac{104057}{\lambda} \sin(T_0 + 0.38^\circ) + \frac{628}{\lambda} \quad (2)$$

для УРАН-2 и

$$U_3 = \frac{937326}{\lambda} \cos(T_0 - 9.6^\circ), \quad V_3 = \frac{640446.8}{\lambda} \sin(T_0 - 9.6^\circ) - \frac{94418.8}{\lambda} \quad (3)$$

для УРАН-3. Здесь T_0 — часовой угол в градусах, λ — длина волны в метрах. Измерения велись одновременно на частотах 25 и 20 МГц в ночное время суток с декабря 1998 г. по февраль 1999 г. Так как измерения фаз функции видности в декаметровом диапазоне с помощью радиоинтерферо-

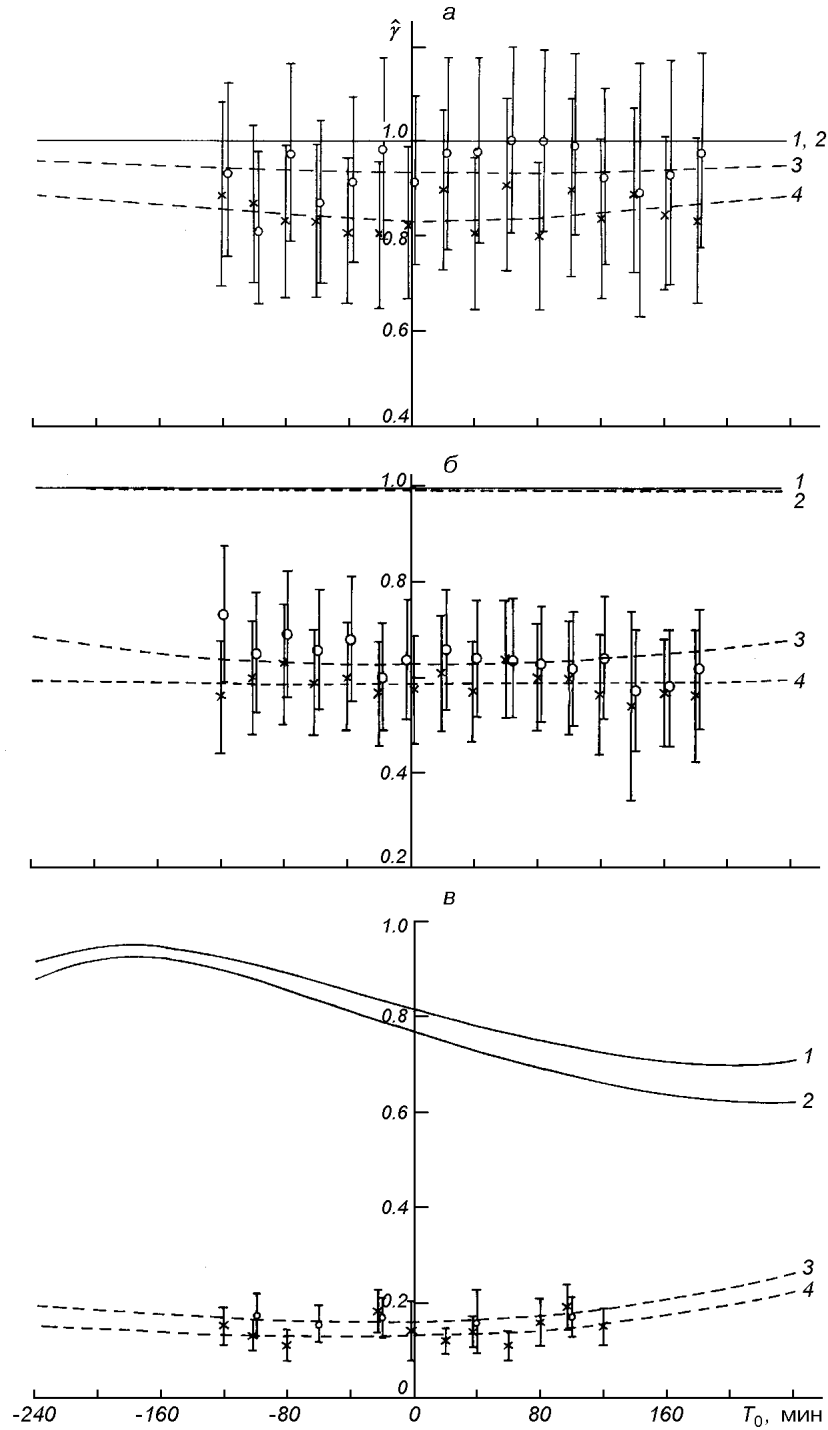


Рис. 2. Значения модуля функции видности γ квазара 3С 216 при разных часовых углах T_0 на интерферометре УРАН-1 (а), УРАН-2 (б), УРАН-3 (в). Кружки и крестики — средневзвешенные данные наблюдений для частот 20 и 25 МГц соответственно и их средние квадратичные отклонения $\pm\sigma_\gamma$. Линии 1 и 2 — расчетные зависимости $\gamma(T_0)$ на частотах 20 и 25 МГц для СВЧ-модели распределения радиояркости квазара, определенной на частоте 4885 МГц с помощью VLA с разрешением $0.4''$ (табл. 1). Линии 3 и 4 — расчетные зависимости $\gamma(T_0)$ на частотах 20 и 25 МГц для оптимальных моделей распределения радиояркости в декаметровом диапазоне радиоволн (табл. 3)

Таблица 1. Параметры СВЧ-модели распределения радиояркости ЗС216

Компонент	$\Delta\alpha_i$	$\Delta\delta_i$	S_i/S_0	$\Delta\theta_{\alpha_i} \times \Delta\theta_{\delta_i}$
Юго-западный	$-0.77''$	$-0.8''$	0.17	$1.5'' \times 0.2''$
Центральный (ядро)	0	0	0.58	$0.15'' \times 0.15''$
Северо-восточный	$0.44''$	$0.6''$	0.25	$0.25'' \times 0.15''$

метров УРАН проводиться пока не могут, с помощью методики, приведенной в [1], определялись только модули функции видности при разных часовых углах $\gamma(T_0)$ в интервале часовых углов от -2^h до $+3^h$ относительно момента кульминации источника. Результаты проведенных наблюдений иллюстрируются рис. 2, где нанесены средневзвешенные величины модуля функции видности $\hat{\gamma}$ при разных часовых углах для интерферометров УРАН-1, УРАН-2 и УРАН-3 на частотах 25 МГц (крестики) и 20 МГц (кружки). Вертикальными линиями указаны величины средних квадратичных отклонений $\sigma_{\hat{\gamma}}$, учитывающих случайные и систематические ошибки средневзвешенных значений для разных часовых углов. Здесь же сплошными кривыми приведены расчетные часовые зависимости модуля функции видности $\gamma_p(T_0)$, ожидаемые при наблюдениях с помощью радиоинтерферометров УРАН, для приведенной в табл. 1 высокочастотной модели квазара, состоящей из трех компактных компонентов с гауссовским распределением радиояркости, если бы в декаметровом диапазоне волн сохранялось такое же распределение радиояркости квазара, как на более высоких частотах. Такие же зависимости $\gamma(T_0)$ наблюдались бы на высоких частотах с помощью интерферометров, базы которых ориентированы так же, как в нашем случае, при тех же значениях D/λ на высоких частотах как у радиоинтерферометров УРАН-1 (3525 и 2820), УРАН-2 (16692 и 10153) и УРАН-3 (78850 и 63080) на частотах 20 и 25 МГц соответственно. Взаимное расположение, соотношение потоков излучения и угловые размеры компонентов используемой при расчетах модели соответствуют данным, полученным в [20] на частоте 4885 МГц. Здесь $\Delta\alpha_i = \alpha_i - \alpha_0$ и $\Delta\delta_i = \delta_i - \delta_0$ — разнос между данным компонентом и центральным по прямому восхождению и склонению в угловых секундах, α_i , δ_i , $\Delta\theta_{\alpha_i}$, $\Delta\theta_{\delta_i}$ — прямое восхождение, склонение, угловые размеры по прямому восхождению и склонению соответственно в секундах дуги, S_i — спектральная плотность потока излучения i -го компонента модели, $S_0 = \sum_{i=1}^3 S_i$.

Расчет $\gamma_p(T_0)$ проводился в соответствии с соотношением

$$\gamma_{pn}(T_0) = \left[\left(\frac{S_1}{S_0} \gamma_{1n}(T_0) + \sum_{i=2}^3 \frac{S_i}{S_0} \gamma_{in}(T_0) \cos \varphi_{in} \right)^2 + \left(\sum_{i=2}^3 \frac{S_i}{S_0} \gamma_{in}(T_0) \sin \varphi_{in} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где

$$\gamma_{in} = \exp[-9.1 \cdot 10^{-6} U_n(T_0) \Delta\theta_{\alpha_i}]^2 \exp[-9.1 \cdot 10^{-6} V_n(T_0) \Delta\theta_{\delta_i}]^2 \quad (5)$$

и

$$\varphi_{in} = 1.75 \cdot 10^{-3} \frac{D_n}{\lambda} (\Delta\alpha_i \cos T_0 + 0.638 \Delta\delta_i \sin T_0) \quad (6)$$

для УРАН-1 ($n = 1$) и УРАН-2 ($n = 2$). Для УРАН-3 ($n = 3$)

$$\varphi_{i3} = 1.75 \cdot 10^{-3} \frac{D_3}{\lambda} \{0.977(\Delta\alpha_1 \cos T_0 + 0.638\Delta\delta_1 \sin T_0) + 0.215[0.722(\Delta\alpha_1 \sin T_0 - 0.638\Delta\delta_1 \cos T_0) - 0.464\Delta\delta_1]\}, \quad (7)$$

где $U_n(T_0)$ и $V_n(T_0)$ — пространственные частоты интерферометров УРАН, определяемые соотношениями (1)—(3), $\hat{\gamma}_{i_n}$ — модуль функции видности i -го компонента модели при наблюдении на n -м интерферометре, φ_{i_n} — разность фаз между откликом n -го интерферометра от i -го и центрального компонента модели распределения радиояркости 3С216, D_n — база соответствующего радиоинтерферометра в метрах.

Как следует из рис. 2, при наблюдениях на всех радиоинтерферометрах наблюдались сравнительно большие средние квадратичные ошибки, что объясняется малой интенсивностью излучения квазара. При наблюдениях 3С 216 на всех радиоинтерферометрах с точностью до разброса данных средневзвешенное значение модуля функции видности $\hat{\gamma}_n$ практически не зависит от часового угла T_0 , что свидетельствует об отсутствии в структуре квазара далеко разнесенных между собой компонентов. При этом относительный разброс данных $\sigma_{\hat{\gamma}}(T_0)/\hat{\gamma}(T_0)$ с увеличением базы интерферометра увеличивается, что объясняется соответствующим уменьшением принимаемых интерференционных сигналов. Например, большой разброс данных при измерениях на радиоинтерферометре УРАН-3 связан с тем, что прием сигналов радиоисточника производился на пределе чувствительности инструмента. Принимаемый при этом интерференционный поток на обеих частотах не превышал 10—12 Ян* при отношении мощности полезного сигнала к шумам около 2.

Таблица 2. Средневзвешенные значения модулей функции видности $\hat{\gamma}$ и интерференционных потоков S_n при предположении об отсутствии часовой зависимости $\gamma(T_0)$ и среднеквадратичные отклонения относительно этих $\sigma_{\hat{\gamma}}$ по результатам наблюдений квазара 3С 216 на 20 и 25 МГц на радиоинтерферометрах УРАН

Радиоинтерферометр	$\nu = 25$ МГц					$\nu = 20$ МГц				
	$\hat{\gamma}$	$\sigma_{\hat{\gamma}}$	S_n , Ян	σ_{S_n} , Ян	S_0 , Ян	$\hat{\gamma}$	$\sigma_{\hat{\gamma}}$	S_n , Ян	σ_{S_n} , Ян	S_0 , Ян
УРАН-1	0.85	0.16	58.2	11		0.93	0.18	67.9	13.1	
УРАН-2	0.59	0.11	40.4	7.5	68.5	0.64	0.12	46.7	8.8	73
УРАН-3	0.14	0.03	9.6	2.1		0.16	0.03	11.7	2.2	

Полагая отсутствие часовой зависимости $\hat{\gamma}_n(T_0)$, на основе данных, полученных для всех часовых углов, были определены средневзвешенные значения $\hat{\gamma}_n$ и соответствующие им интерференционные потоки S_n на 20 и 25 МГц для трех радиоинтерферометров, которые приведены в табл. 2. Здесь же указаны средние квадратичные отклонения относительно этих средневзвешенных значений $\sigma_{\hat{\gamma}}$, σ_{S_n} и полные потоки радиоизлучения квазара S_0 .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение приведенных на рис. 2 результатов измерений с расчетными зависимостями γ_p от T_0 для СВЧ-модели распределения радиояркости

* 1 Ян = 10^{-26} Дж/м²

ЗС 216 во всех случаях, особенно для интерферометров УРАН-2 и УРАН-3, показывает, что эти расчеты совершенно не соответствуют экспериментальным данным, полученным в декаметровом диапазоне, что свидетельствует об очень существенном изменении структуры объекта на низких частотах.

Учитывая, что простейшая модель распределения радиояркости ЗС 216 на декаметровых волнах, состоящая из одного компактного либо протяженного компонента, даже качественно противоречит приведенным данным (в первом случае на УРАН-1 должно быть $\hat{\gamma} \approx 1$, во втором на УРАН-2 и УРАН-3 — $\hat{\gamma} \approx 0$), рассмотрим наиболее вероятную модель распределения радиояркости квазара, которая может соответствовать результатам эксперимента.

Наиболее простой вариант такой модели состоит из одного компактного и одного протяженного компонентов, центры которых в общем случае могут не совпадать. Интерференционный поток $S_{и1}$, принимаемый радиоинтерферометром УРАН-1 при наблюдениях радиоисточника с такой моделью распределения радиояркости, равен (индекс «1» всюду относится к УРАН-1)

$$S_{и1} = |\dot{\gamma}_{к1} S_k + \dot{\gamma}_{п1} S_n|, \quad (8)$$

где $\dot{\gamma}_{к1}$ и $\dot{\gamma}_{п1}$ — комплексные функции видности компактного и протяженного компонентов радиоисточника, а S_k и S_n — соответствующие потоки их радиоизлучения.

В общем случае при произвольном позиционном угле и расстоянии между центрами компонентов, полагая $S_0 = S_k + S_n$, на основании (8) можно получить

$$\gamma_{п1} = \gamma_{к1} \cos \varphi_1 + \frac{\sqrt{\hat{\gamma}_1^2 - \gamma_{к1}^2 (1 - S_n/S_0)^2 \sin^2 \varphi_1} - \gamma_{к1} \cos \varphi_1}{S_n/S_0}. \quad (9)$$

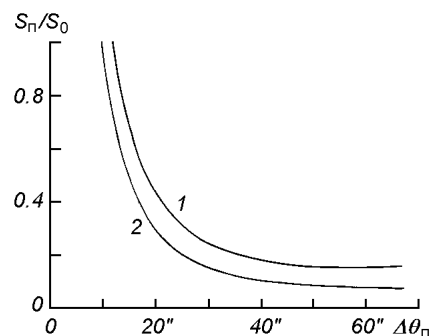
Здесь $\gamma_{к1}$ и $\gamma_{п1}$ — модули функций $\dot{\gamma}_{к1}$ и $\dot{\gamma}_{п1}$; $\hat{\gamma}_1$ — средневзвешенное значение модуля функции видности источника, измеренное на УРАН-1 на данной частоте ($\hat{\gamma}_1 = S_{и1}/S_0$), φ_1 — сдвиг фаз между откликами радиоинтерферометра от компактного и протяженного компонентов, т. е. разность фаз $\dot{\gamma}_{к1}$ и $\dot{\gamma}_{п1}$, описываемая соотношением (6).

Поскольку часовой зависимости модуля функции видности $\hat{\gamma}_1(T_0)$ в эксперименте не наблюдается, ограничимся частным случаем, когда центры компонентов совпадают или разнесены незначительно ($\varphi_1 \rightarrow 0$). Тогда для такой модели распределения радиояркости (типа «ядро—гало») выражение (9) приводится к виду

$$\gamma_{п1} = \gamma_{к1} - \frac{\gamma_{к1} - \hat{\gamma}_1}{S_n/S_0}. \quad (10)$$

Соотношения (9) и (10) устанавливают связь между угловыми размерами протяженного компонента $\Delta\theta_n$ и его долей в общем потоке радиоизлучения источника S_n/S_0 при данном средневзвешенном значении модуля функции видности $\hat{\gamma}_1$. Они позволяют, в частности, определить минимально возможный размер $\Delta\theta_{n \min}$ и поток протяженного компонента $(S_n/S_0)_{\min}$. Для иллюстрации на рис. 3 приведены рассчитанные для ЗС 216 в соответствии с (10) при $\gamma_{к1} \approx 1$ зависимости $S_n/S_0 = f(\Delta\theta_n)$ для интерферометра УРАН-1 на частотах 25 МГц (кривая 1) и 20 МГц (кривая 2). Как следует из рис. 3, величина $\Delta\theta_{n \min}$ не может быть меньше 12.5^m и 10.5^m , а $(S_n/S_0)_{\min}$ — меньше 0.15 и 0.08 на частотах 25 и 20 МГц соответственно.

Рис. 3. Зависимость относительной величины потока излучения S_{π}/S_0 протяженного компонента распределения радиояркости 3С216 на декаметровых волнах от его углового размера $\Delta\theta_{\pi}$ при измерениях на радиоинтерферометре УРАН-1 на частотах 25 МГц (1) и 20 МГц (2) для модели распределения радиояркости типа «ядро—гало»



По зависимостям, приведенным на рис. 3, можно найти размеры протяженного компонента на частотах 25 и 20 МГц, однако для этого должны быть определены относительные потоки его радиоизлучения на обеих частотах.

С этой целью рассмотрим результаты наблюдений 3С 216 на радиоинтерферометрах УРАН-2 и УРАН-3. При приведенных значениях $\Delta\theta_{\pi \min}$ модули функции видности протяженного компонента при наблюдениях на интерферометрах УРАН-2 и УРАН-3 оказываются малыми, и соответствующие интерференционные потоки протяженного компонента $S_{\text{ин}2} = \gamma_{\text{п}2} S_{\pi}$ и $S_{\text{ин}3} = \gamma_{\text{п}3} S_{\pi}$ существенно меньше уровня шумов инструментов. Учитывая это, наиболее вероятной моделью распределения радиояркости, определяющей отклик этих интерферометров в декаметровом диапазоне, является однокомпонентная. Угловой размер $\Delta\theta_{\kappa}$ и поток радиоизлучения $S_{\kappa}(\nu)$ компактного компонента можно определить на основе наблюдений на этих инструментах.

Так как при гауссовской форме распределения радиояркости квазара при такой модели

$$\begin{aligned} \hat{\gamma}_2(T_0) &= \frac{S_{\kappa}}{S_0} \gamma_{\kappa_2}(T_0) = \\ &= \frac{S_{\kappa}}{S_0} \exp[-9.1 \cdot 10^{-6} U_2(T_0) \Delta\theta_{\kappa\alpha}]^2 \exp[-9.1 \cdot 10^{-6} V_2(T_0) \Delta\theta_{\kappa\delta}]^2 \end{aligned} \quad (11)$$

и

$$\begin{aligned} \hat{\gamma}_3(T_0) &= \frac{S_{\kappa}}{S_0} \gamma_{\kappa_3}(T_0) = \\ &= \frac{S_{\kappa}}{S_0} \exp[-9.1 \cdot 10^{-6} U_3(T_0) \Delta\theta_{\kappa\alpha}]^2 \exp[-9.1 \cdot 10^{-6} V_3(T_0) \Delta\theta_{\kappa\delta}]^2, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\Delta\theta_{\kappa\alpha}$ и $\Delta\theta_{\kappa\delta}$ — угловые размеры компактного компонента по прямому восхождению и склонению соответственно, по отношению $\xi(T_0) = \hat{\gamma}_3(T_0)/\hat{\gamma}_2(T_0)$ можно определить угловой размер компактного компонента $\Delta\theta_{\kappa}$, а по выражениям (11) или (12) — потоки радиоизлучения $S_{\kappa}(\nu)$ на частотах 25 и 20 МГц. На рис. 4 соответствующими значками приведены результаты определения $\xi(T_0)$ при разных T_0 на частотах 25 МГц (крестики) и 20 МГц (кружки). Вертикальными линиями указаны среднеквадратичные отклонения этих величин. Здесь же сплошными кривыми нанесены расчетные отношения $\xi(T_0)$ для разных значений $\Delta\theta_{\kappa\alpha} = \Delta\theta_{\kappa\delta} = \Delta\theta_{\kappa}$ от 0 до 3"—4". Как видно, в интервале часовых углов $\pm 2^{\text{h}}$ в эксперименте практически не наблюдается зависимости величины ξ от часового угла. (Наблюдаемая на рис. 4 на расчетных кривых слабая зависимость ξ от T_0 связана в основном с подобной зависимостью γ_{κ_3} от T_0 при условии $\Delta\theta_{\kappa\alpha} = \Delta\theta_{\kappa\delta}$). При этом средневзвешенная по всем часовым углам величина равняется $\hat{\xi} =$

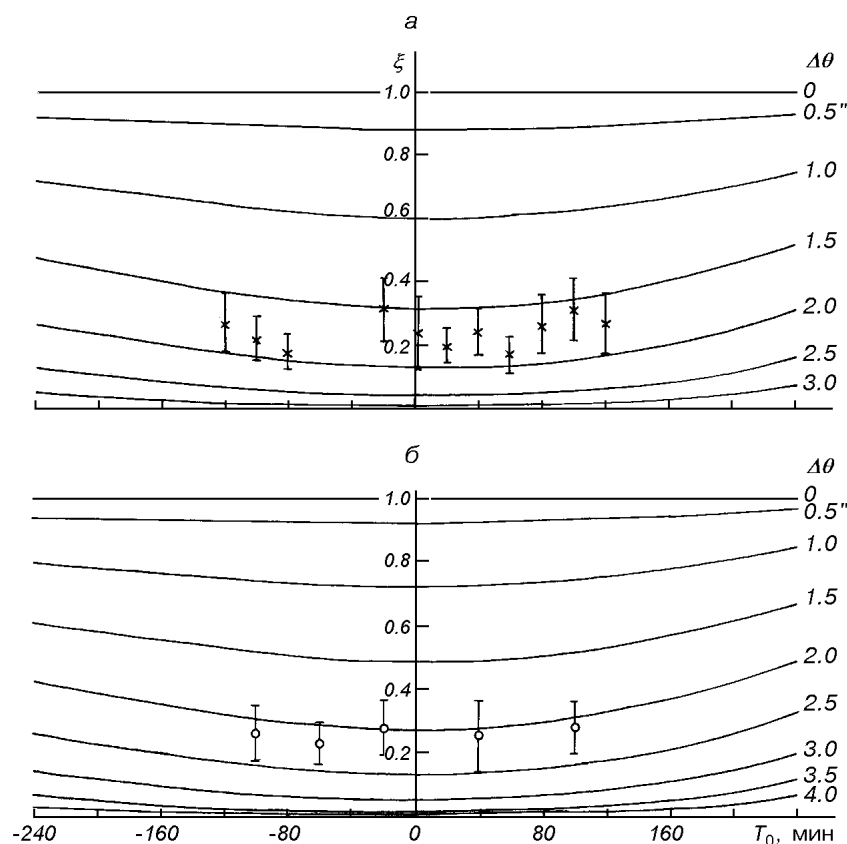


Рис. 4. Значения отношения $\xi = S_{H3}/S_{H2}$ интерференционных потоков 3С 216 на частоте 25 МГц (а) и 20 МГц (б), принятых на интерферометрах УРАН-3 и УРАН-2 при совпадающих значениях T_0 . Сплошные кривые — расчет для однокомпонентной изотропной модели распределения радиояркости квазара в декаметровом диапазоне радиоволн

$= 0.23 \pm 0.03$ на частоте 25 МГц и 0.26 ± 0.05 на частоте 20 МГц. Соответствующая этим данным величина $\Delta\theta_{\kappa\alpha}$ равна $1.73^{+0.08}_{-0.07}$ и $2.05^{+0.15}_{-0.13}$. Величина потока радиоизлучения компактного компонента (средневзвешенного по измерениям на УРАН-2 и УРАН-3) S_{κ}/S_0 оказалась равной 0.62 ± 0.14 на 25 МГц и 0.65 ± 0.15 на 20 МГц. Средневзвешенные значения потоков радиоизлучения протяженного компонента равны $S_{\pi}/S_0 = 0.38 \pm 0.14$ и 0.35 ± 0.15 , а его размеры составляют 22.5^{+9}_{-4} и $19.0^{+6.5}_{-3.7}$ соответственно.

Более точно размеры и потоки обоих компонентов можно определить путем подбора их параметров с помощью ЭВМ. Задавая параметры выбранной модели, нужно рассчитать в соответствии с (4), (5) зависимость $\gamma_p(T_0)$ и сравнить с аналогичной экспериментальной зависимостью $\hat{\gamma}(T_0)$. Варьированием параметров модели проводилось согласование расчетных зависимостей с данными, полученными в эксперименте. В качестве меры совпадения расчетных и экспериментальных данных мы использовали стандартный χ^2 -критерий [10]

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{[\hat{\gamma}_i(T_0) - \gamma_{pi}(T_0)]^2}{\sigma_{\hat{\gamma}_i}^2}, \quad (13)$$

где N — число независимых измерений модуля функции видности. Полагалось, что наиболее достоверной модели распределения радиояркости квазара

соответствовал минимум χ^2 . При этих расчетах для УРАН-3 и УРАН-2 определялись оптимальные значения параметров $\Delta\theta_{\kappa\alpha}$, $\Delta\theta_{\kappa\delta}$, S_{κ}/S_0 и S_{π}/S_0 . При аналогичных расчетах для УРАН-1 для модели «ядро—гало» находились размеры протяженного компонента $\Delta\theta_{\pi}$, полагая размеры компактного компонента и потоки обоих компонентов определенными ранее.

Результаты этих расчетов с уточненными параметрами наиболее достоверной простейшей модели распределения яркости квазара 3С 216 в декаметровом диапазоне радиоволн при изотропном протяженном компоненте даны в табл. 3. В табл. 4 приведены значения χ_0^2 и вероятности их превышения $W_n(\chi^2 > \chi_0^2)$ для всех зависимостей $\hat{\gamma}(T_0)$ рис. 2. Здесь n — число степеней свободы вероятностного распределения χ^2 , p — число параметров, определяемых моделью распределения радиояркости

$$n = N - 1 - p. \quad (14)$$

Результаты расчетов зависимостей $\gamma_p(T_0)$ для трех радиоинтерферометров УРАН для модели распределения радиояркости квазара, приведенной в табл. 3 и соответствующие данным табл. 4, приведены на рис. 2 штриховыми линиями (3) и (4) для частот 20 и 25 МГц соответственно.

Радиоизображение компактного компонента 3С 216 на 25 МГц (1) и 20 МГц (2) приведено на рис. 5 на фоне СВЧ-карты квазара, полученной на 4885 МГц в [20].

На основании приведенного можно сделать следующие выводы.

Во-первых, рассчитанным для оптимальных моделей распределения радиояркости квазара в декаметровом диапазоне волн зависимостям $\gamma_p(T_0)$ свойственны сравнительно небольшие значения χ_{\max}^2 , вероятности превышения которых (за исключением измерений на УРАН-3 на частоте 20 МГц, где мало данных) не менее 0.92. (Для сравнения приведем величины χ^2 , характеризующие расхождение наших экспериментальных данных с расчетными зависимостями $\gamma_p(T_0)$ для СВЧ-модели распределения радиояркости квазара (кривые 1 и 2 на рис. 2). $\chi^2 = 14.3, 174.7, 3543$ на частоте 25 МГц

Таблица 3. Параметры наиболее достоверной простейшей 2-компонентной модели «ядро—гало» распределения радиояркости квазара 3С 216 в декаметровом диапазоне волн

ν , МГц	S_{κ}/S_0	S_{π}/S_0	$\Delta\theta_{\kappa\alpha}$	$\Delta\theta_{\kappa\delta}$	$\Delta\theta_{\pi}$
20	0.63 ± 0.08	0.37 ± 0.04	$2'' \pm 0.1''$	$2.4'' \pm 0.12''$	$18'' \pm 2''$
25	0.61 ± 0.08	0.39 ± 0.04	$1.7'' \pm 0.07''$	$2.1'' \pm 0.08''$	$23'' \pm 3''$

Таблица 4. Величины χ_0^2 и соответствующие вероятности их превышения $W_n(\chi^2 > \chi_0^2)$ для зависимостей $\hat{\gamma}(T_0)$, рассчитанных для модели табл. 3 и экспериментальных данных рис. 2

ν , МГц	Интерферометр УРАН-1	Интерферометр УРАН-2	Интерферометр УРАН-3
20	$\chi_0^2 = 1.4,$ $W_{n=10}(\chi^2 > 1.4) > 0.995$	$\chi_0^2 = 1.73,$ $W_{n=12}(\chi^2 > 1.73) > 0.995$	$\chi_0^2 = 0.257,$ $W_{n=1}(\chi^2 > 0.257) > 0.63$
25	$\chi_0^2 = 0.72,$ $W_{n=10}(\chi^2 > 0.72) > 0.995$	$\chi_0^2 = 0.72,$ $W_{n=12}(\chi^2 > 0.72) > 0.995$	$\chi_0^2 = 2.61,$ $W_{n=7}(\chi^2 > 2.61) > 0.92$

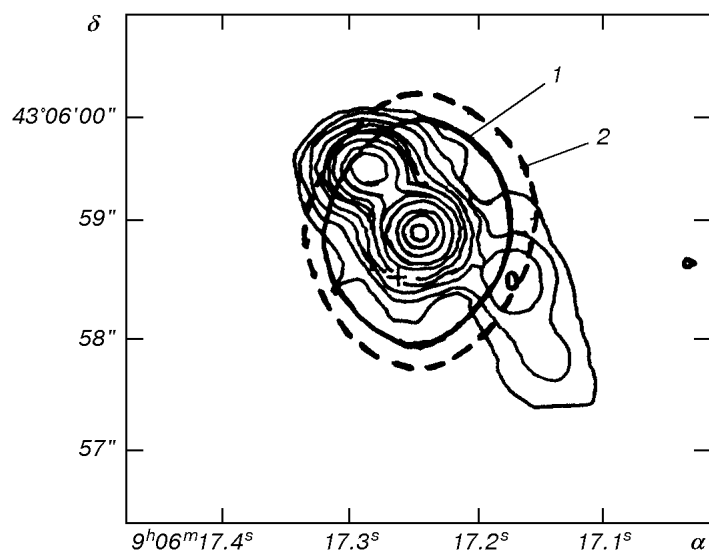


Рис. 5. Наиболее вероятные модели распределения радияркости компактного компонента 3С 216 в декаметровом диапазоне волн (1 — 25 МГц, 2 — 20 МГц) на фоне радиокарты радиогалактики, полученной в работе [20] на частоте 4885 МГц

для интерферометров УРАН-1, УРАН-2 и УРАН-3 соответственно и 3.15, 125.9, 1276 на частоте 20 МГц). Это подтверждает достоверность полученной 2-компонентной модели типа «ядро—гало» для рассматриваемого объекта на низких частотах. На расчетных зависимостях (рис. 2), как и в эксперименте, в интервале $-2^{\text{h}} < T_0 < +3^{\text{h}}$ для интерферометров УРАН-1 и УРАН-2 и $-2^{\text{h}} < T_0 < +1.5^{\text{h}}$ для УРАН-3 не наблюдается заметной зависимости модуля функции видности γ от часового угла T_0 . Лишь вне интервала, в котором проводились измерения, на расчетных зависимостях $\gamma_p(T_0)$ имеет место монотонное увеличение γ_p с увеличением T_0 , наиболее четко проявляющееся для интерферометра УРАН-3, где благодаря большому значению D/λ существенно разрешается компактный компонент источника. Заметим, что при наблюдениях на интерферометрах УРАН-1 и УРАН-2 этот компонент практически не был разрешен ($\gamma_k > 0.95$).

Во-вторых, отметим, что данные табл. 3 для разных частот хотя и не сильно, но различаются, что может быть связано как с их частотной зависимостью, так и с разбросом из-за ошибок измерений. В частности, увеличение угловых размеров компактного компонента с уменьшением частоты может быть связан с эффектом рассеяния радиоволн в космической среде. В то же время некоторое уменьшение размеров протяженного компонента $\Delta\theta_{\text{п}}$ на частоте 20 МГц может быть связано только с погрешностями измерений, так как рассеяние радиоволн в этом случае несущественно. Анализ данных показывает, что скорее всего это связано с ошибкой измерения $\hat{\gamma}$ в 0.03 при $\sigma_{\hat{\gamma}}$ (табл. 2) при наблюдениях на УРАН-1 на частоте 20 МГц. Наиболее вероятно, что угловые размеры протяженного компонента на обеих частотах одинаковы и равны средней величине $\Delta_{\text{п ср}} = 20.5'' \pm 2.5''$.

Благодаря высокому угловому разрешению радиоинтерферометра УРАН-3 удалось установить некоторую вытянутость компактного компонента по склонению, однако анизотропию протяженного компонента определить не удалось из-за больших погрешностей измерения $\hat{\gamma}$.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАЗАРА И ЕГО КОМПОНЕНТОВ

Рассмотрим связь структуры квазара с его спектральными характеристиками, приведенными на рис. 6. Здесь: 1 — зависимость результирующего излучения квазара S_0 от частоты по результатам измерений в диапазоне от 14.7 до 10000 МГц, 2, 3 и 4 — спектральные характеристики компонентов — центрального (ядра) $S_{\text{я}}(\nu)$ (кружки), северо-восточного $S_{\text{с-в}}(\nu)$ (квадраты) и юго-западного $S_{\text{ю-з}}(\nu)$ (треугольники), определенные в интервале частот от 408 МГц до 8000 МГц. Участки зависимостей, где проводились измерения, нанесены сплошными кривыми, экстраполированные — штриховыми. Данные о спектральной плотности результирующего потока радиоизлучения 3С 216 на частотах от 14.7 до 25 МГц получены путем наблюдений на УТР-2 в ходе данной работы.

Кривая 2 на частотах ниже 408 МГц получена линейной экстраполяцией (в логарифмическом масштабе $\lg S - \lg \nu$) в область низких частот зависимости $S_{\text{я}} \propto \nu^{-\alpha_2}$ со спектральным индексом $\alpha_2 = 0.75$, определенным на высоких частотах, с последующим согласованием с приведенными выше данными интерферометрических измерений компактного компонента квазара на частотах 25 и 20 МГц.

Спектр северо-восточного компонента $S_{\text{с-в}}(\nu)$ (кривая 3) на частотах ниже 408 МГц определен с учетом деформации спектра полного радиоизлучения квазара на частотах ниже 170 МГц. Как следует из рис. 6, на этой

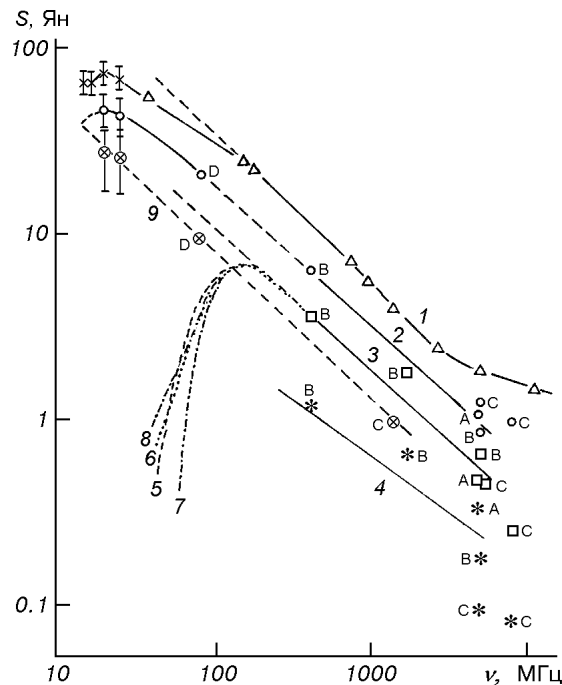


Рис. 6. Зависимости спектральной плотности радиоизлучения 3С 216 от частоты. Кривая 1 (треугольники) — для полного излучения объекта ($S_0(\nu)$), 2 (кружки) — для ядра, 3 и 4 (квадратики и звездочки) — для северо-восточного и юго-западного компонентов квазара, 5 — спектр северо-восточного компонента на частотах меньше 170 МГц; 6, 7, 8 — расчеты для северо-восточного компонента: при учете в нем реабсорбции, при учете затухания излучения в плазме на трассе распространения волны и при учете затухания в самом компоненте. В верхней части рисунка представлены результаты наших измерений и их стандартные отклонения для полного потока (крестики), компактного (кружки) и протяженного (крестики в кружках) компонентов. Литературные источники данных указаны буквами: А — [20], В — [22], С — [23], D — [16]

частоте наблюдается излом зависимости $S_0(\nu)$: на частотах $\nu > 170$ МГц спектральный индекс $\alpha = 0.81$, а при $\nu < 170$ МГц $\alpha_1 = 0.58$. Разница линейно (в логарифмическом масштабе) экстраполированной в область частот $\nu < 170$ МГц спектральной характеристики $S_{0s}(\nu)$ (штриховая линия) и реальным спектром $S_0(\nu)$ (сплошная кривая)

$$\Delta S(\nu) = S_{0s}(\nu) - S_0(\nu) \quad (15)$$

естественно связана с деформацией спектра одного из компонентов квазара. Из анализа приведенных данных следует, что излом результирующего спектра радиоизлучения на частотах ниже 170 МГц скорее всего связан со спектром радиоизлучения северо-восточного компонента $S_{c-b}(\nu)$. На рис. 6 спектральная зависимость этого компонента на частотах меньше 170 МГц представлена как разность между экстраполированной зависимостью $S_{c-b}(\nu)$ и величиной $\Delta S(\nu)$ (штриховая кривая 5)

$$\nu < 170 \text{ МГц: } \Delta S_{c-b}(\nu) = S_{c-b}(\nu) - \Delta S(\nu). \quad (16)$$

При этом на спектральной зависимости $S_{c-b}(\nu)$ наблюдается четко выраженный максимум на частоте $\nu_m \approx 160 \pm 10$ МГц с потоком излучения в максимуме $S_{c-b\max}(\nu) = 6.8$ Ян. При $\nu < \nu_m$ наблюдается быстрое уменьшение интенсивности излучения этого компонента с уменьшением частоты примерно как $\nu^{5/2}$.

Спектр третьего (юго-западного) компонента модели распределения радиояркости квазара 3С 216 на частотах ниже 408 МГц пока не определен. Учитывая результаты радиоинтерферометрических наблюдений на декаметровых волнах, по-видимому, на низких частотах этот компонент не играет заметной роли.

Представляет интерес выяснить, какие физические процессы в космосе могут приводить к наблюдаемым спектрам с максимумом излучения на определенной частоте как у северо-восточного, так и у центрального компонента (рис. 6) модели распределения радиояркости квазара 3С 216. Как показано в работах [2—4], физическими процессами, приводящими к так называемым спектрам II типа (с экстремумом) могут быть реабсорбция (самопоглощение излучения), затухание излучения в космической плазме на трассе распространения, а также затухание в плазме самого космического радиоисточника.

В случае реабсорбции можно по результатам измерений спектра на высоких частотах определить частоту максимума излучения ν_m и максимальный поток радиоизлучения S_m . Так, согласно [2, 4]

$$\nu_m = \left[\frac{S_1 \nu_1^\alpha H_\perp (1+z)^{1/2}}{\tau_0 (\Delta\theta)^2} \right]^{\frac{2}{2\alpha+5}} \quad (17)$$

$$S_m = S_1 \left(\frac{\nu_1}{\nu_m} \right)^\alpha \frac{1 - e^{-\tau_0}}{\tau_0}. \quad (18)$$

Здесь τ_0 — оптическая толщина на частоте ν_m , определяемая соотношением

$$e^{\tau_0} = 1 + \frac{2\alpha + 5}{5} \tau_0, \quad (19)$$

S_1 , Ян — поток излучения компонента радиоисточника на частоте $\nu_1 > \nu_m$ (в МГц), H_\perp , мкЭ* — поперечная к направлению движения релятивистских

* $1 \text{ Э} = 79.5775 \text{ А/м}$

электронов составляющая напряженности космического магнитного поля, z — красное смещение, $\Delta\theta$ — угловой размер объекта в секундах дуги. Отметим, что на частотах $\nu_1 \gg \nu_m$, где спектр $S \sim \nu^{-\alpha}$, величина $S_1\nu_1^\alpha$, входящая в приведенные выражения, для данного радиоисточника не зависит от частоты: $S_1\nu_1^\alpha = S_1\nu_1^\alpha$, т. е. измерение потока излучения S_1 может проводиться на любой частоте $\nu_1 \gg \nu_m$ в пределах степенного участка спектра излучения.

Проведенные на основании (17) и (18) расчеты при $\alpha = \alpha_3 = 0.75$, $z = 0.668$, $\nu_1 = 4885$ МГц, $S_1 = 0.62$ Ян, $H_\perp = 100$ мкЭ, $\tau_0 = 0.505$ показали, что эффектом реабсорбции можно объяснить наблюдаемый максимум спектра $S_{c-b}(\nu)$ при $\Delta\theta = 0.028''$. При этом $\nu_{mp} = 150$ МГц и $S_{mp} = 6.7$ Ян, что хорошо согласуется с данными рис. 6. Спектральная зависимость при учете реабсорбции, определяемая выражением [2, 4]

$$S(\nu) = S_m \left(\frac{\nu}{\nu_m} \right)^{5/2} \frac{1 - e^{-\tau_0(\nu/\nu_m)^{-\alpha-5/2}}}{1 - e^{-\tau_0}}, \quad (20)$$

приведена на рис. 6 пунктирной линией (кривая б). Эта расчетная зависимость неплохо согласуется со спектром $S_{c-b}(\nu)$ (кривой 5), за исключением области очень малых потоков, где существенны ошибки измерений.

Таким образом, эффект реабсорбции при анализе спектральной зависимости северо-восточного компонента модели распределения радиояркости 3С 216 позволяет объяснить особенности спектра $S_{c-b}(\nu)$ на частотах ниже 170 МГц. Следует, однако, отметить, что эти результаты получены при $\Delta\theta = 0.028''$, что существенно меньше, чем определено измерениями на СВЧ: в работе [20] размер этого компонента оценивается как $0.25'' \times 0.15''$. В то же время расчеты в соответствии с (17) и (18) при указанных значениях α , τ_0 , H_\perp , z , ν_1 , S_1 и размере северо-восточного компонента $0.25'' \times 0.15''$ приводят к величинам $\nu_m = 45.6$ МГц и $S_m = 16.2$ Ян, что совершенно не согласуется с экспериментальными данными. Возможно, это расхождение объясняется недостаточно высоким угловым разрешением измерений, выполненных на СВЧ ($0.4''$ в работе [20]). Поэтому до проведения наблюдений радиоизображения 3С 216 в дециметровом и метровом диапазоне волн с достаточно высоким разрешением вывод о влиянии реабсорбции на спектр северо-восточного компонента нельзя считать окончательным.

Учет других физических процессов, которые могут влиять на вид спектральной зависимости $S_{c-b}(\nu)$ на частотах ниже 170 МГц, иллюстрируется штрих-пунктирными кривыми 7 и 8.

Спектральная зависимость (7) соответствует возможному влиянию на спектр северо-восточного компонента затухания электромагнитного излучения в ионизированной космической среде на трассе распространения между радиоисточником и наблюдателем. Расчет проведен при $\alpha = 0.75$ и $\tau_0 = 0.16$ в соответствии с соотношением [3, 4]

$$\ln \frac{S(\nu)}{S_m} = \alpha \ln \frac{\nu_m}{\nu} + \frac{\alpha}{1+D} \left[1 - \frac{\nu_m}{\nu} \left(1 + D \ln \frac{\nu_m}{\nu} \right) \right] \quad (21)$$

при $D = 2.69$ ($D = \frac{\alpha}{\tau_0} - 2$). Учитывая, что в этом случае согласно [6]

$$\frac{1}{D} + \ln \nu_m = 17.7 + 1.5 \ln T_e, \quad (22)$$

где T_e — электронная температура поглощающей излучение плазмы. При приведенных данных T_e оказывается равной 2.7 К. Кроме того, поскольку согласно [6]

$$(\alpha - 2\tau_0)\nu_m^2 = \frac{9.8 \cdot 10^{-3} N_e^2 L}{T_e^{3/2}}, \quad (23)$$

где $N_e^2 L$ — мера эмиссии, N_e , см^{-3} — электронная плотность плазмы, L , см — протяженность области, заполненной плазмой, ν , Гц — частота, получим

$$N_e^2 L \approx 0.44 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-5} \approx 1.43 \text{ пк/см}^6. \quad (24)$$

При L , равном размеру северо-восточного компонента квазара (около 2500 пк), электронная концентрация, соответствующая полученным данным, примерно равна 0.02 см^{-3} . Учитывая, что такие холодные облака плазмы со столь низкой электронной концентрацией в космосе не обнаруживаются, а также то, что спектральная характеристика (7) заметно отличается от спектра $S_{c-b}(\nu)$ (кривая 5), следует считать, что рассмотренный физический механизм в данном случае не объясняет спектральную зависимость $S_{c-b}(\nu)$ на низких частотах.

Аналогичный результат имеет место при учете еще одного физического механизма, влияющего на вид спектральных зависимостей — затухания излучения в ионизированной среде самого радиоисточника. Хотя в этом случае спектральная характеристика $S_{c-b}(\nu)$, рассчитанная в соответствии с [4]

$$S_{c-b}(\nu) = S_m \left(\frac{\nu}{\nu_m} \right)^{2-\alpha} \frac{1}{1 + D \ln(\nu_m / \nu)} \frac{1 - e^{-\tau_0(\nu_m/\nu)^2 [1 + D \ln(\nu_m/\nu)]}}{1 - e^{-\tau_0}} \quad (25)$$

при $\alpha = 0.75$, $\tau_0 = 0.33$, $D = 2.84$, $\nu_m = 150 \text{ МГц}$ и $S_m = 6.7$ (штрих-пунктирная кривая 8), неплохо согласуется с кривой 5, однако определенные из этого расчета согласно [4, 6] параметры среды $T_e = 2.7 \text{ К}$, $N_e^2 L = 3 \text{ пк/см}^6$ и $N_e = 0.04 \text{ см}^{-3}$, как уже отмечалось, не соответствуют характеристикам плазмы, наблюдаемой в космосе.

С помощью приведенных соотношений можно также попытаться объяснить вид спектральной зависимости ядра $S_\alpha(\nu)$ на декаметровых волнах. Так, учет эффекта реабсорбции на основании (17)—(19) при $\alpha = 0.75$, $\tau_0 = 0.505$, $z = 0.668$, $H_\perp = 100 \text{ мкЭ}$, $\nu_1 = 4885 \text{ МГц}$, $S_1 = 0.96 \text{ Ян}$ и размере компактного компонента $\Delta\theta_k = 2.05''$, дает $\nu_m = 12.2 \text{ МГц}$ и $S_m = 76.4 \text{ Ян}$.

Как следует из рис. 6, эти значения ν_m и S_m не согласуются со спектром $S_\alpha(\nu)$, где $\nu_m = 20 \text{ МГц}$ и $S_m = 46 \text{ Ян}$. Наблюдаемая на спектре частота максимума излучения соответствует расчету (17)—(19) для приведенных данных при размере компактного компонента (ядра) $\Delta\theta_k = 0.96''$. В этом случае расчетная величина максимального потока излучения $S_m = 46.6 \text{ Ян}$, что практически совпадает с данными рис. 6.

Приведенный спектр $S_\alpha(\nu)$ в области низких частот не объясняется другими указанными выше физическими механизмами, которые могут существенно влиять на вид спектральных характеристик космических радиоисточников. Например, учет затухания в космической плазме на трассе распространения волн при $\nu_m = 20 \text{ МГц}$ и $S_m = 46 \text{ Ян}$, $\alpha = 0.75$, $\tau_0 = 0.24$ и $D = 1.1$ приводит к следующим значениям параметров космической плазмы, которые не наблюдаются в космосе: $T_e = 1 \text{ К}$, $N_e^2 L = 3.6 \cdot 10^{-3} \text{ пк/см}^6$ и $N_e = 5.5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-3}$ при размере L , соответствующему ядру квазара с угловым размером $0.92''$. Учет затухания в ионизированной среде самого ядра при $\nu_m = 20 \text{ МГц}$, $S_m = 46 \text{ Ян}$, $\alpha = 0.75$, $\tau_0 = 0.5$ и $D = 1.3$ приводит к отрицательной величине меры эмиссии $N_e^2 L$, что, естественно, исключается.

Таким образом, экстремумы, наблюдаемые на спектрах северо-восточного компонента $S_{c-b}(\nu)$ и ядра $S_\alpha(\nu)$ квазара 3С 216, возможно, объясняют-

ся эффектом самопоглощения излучения в этих компонентах (реабсорбцией), однако для окончательного решения этого вопроса необходимы дополнительные спектральные измерения потоков всех компонентов в метровом диапазоне волн и спектра ядра квазара в декаметровом диапазоне на частотах ниже 20 МГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из радиоинтерферометрических наблюдений следует, что на частотах ниже 30 МГц квазар 3С 216 состоит из двух компонентов — компактного с размерами порядка $1.7''$ — $2.4''$ и протяженного с размерами около $21''$. При этом поток излучения компактного компонента составляет $0.61S_0$ и $0.63S_0$, а протяженного — $0.39S_0$ и $0.37S_0$ на частотах 25 и 20 МГц соответственно. Для частот $\nu < 20$ МГц можно ожидать, по-видимому, уменьшения доли в общем излучении компактного компонента и соответствующего увеличения излучения протяженного, что следует из вида спектральной зависимости полного потока излучения в интервале частот 20—14.7 МГц. Поэтому на частотах ниже 14.7 МГц распределение радиояркости квазара может стать однокомпонентным.

Различие в размерах компактного компонента, определенного по радиоинтерферометрическим и спектральным измерениям, как представляется, связано скорее всего не с ошибками эксперимента, а с тем, что по спектральным зависимостям при наличии эффекта реабсорбции определяется истинный размер радиоисточника, а по радиоинтерферометрическим измерениям — наблюдаемый у Земли, который увеличивается за счет рассеяния излучения в ионосфере, межзвездной и межпланетной среде. Как следует из различных исследований (например [7]), этот эффект на частотах 20—25 МГц может достигать $1''$ и более. Согласно нашим данным угол рассеяния в этом случае составляет около $1.3''$ — $1.4''$ на 25 МГц и $1.8''$ — $2.0''$ на 20 МГц. Рассеянием может объясняться также увеличение углового размера ядра квазара на 20 МГц по сравнению с 25 МГц.

Представляет интерес сопоставить определенные нами параметры модели распределения радиояркости квазара 3С 216 в декаметровом диапазоне с результатами радиоинтерферометрических измерений на частоте 81.5 МГц [16]. Сравнивая эти данные, отметим, что потоки излучения ядра и протяженного компонента, впервые обнаруженного в [16], совпадают со спектрами рис. 6, если учесть, что на 81.5 МГц наблюдались два компактных компонента (поток ядра 20 Ян и поток северо-восточного компонента 4.5 Ян). Однако угловые размеры этих компонентов $\Delta\theta_k \approx 2.2''$ и $\Delta\theta_n \approx 66''$ не согласуются с приведенными выше. Если различие в угловом размере компактного компонента (около $1''$ на 81.5 МГц) может быть связано с рассеянием радиоволн на плазме сверхкороны Солнца из-за сравнительно небольших элонгаций (от 32° до 49°) при наблюдениях этого радиоисточника, то расхождение в размерах протяженного компонента в три раза не может объясняться этим эффектом. Можно предположить, что такой большой размер протяженного компонента (гало) в [16] связан с ошибками измерений модуля функции видности γ квазара при наблюдениях всего на одном радиоинтерферометре с базой $D = 1350\lambda$, так как, например, при модуле функции видности на этой базе, равном $\gamma + \Delta\gamma$, размер гало оказывается уже около $20''$. К сожалению, размер гало в работе [16] определялся по данным наблюдений всего на двух радиоинтерферометрах с базами 100λ и 1350λ .

Работа выполнена при поддержке грантов INTAS 97-1964, INTAS CNES-1450 и проекта № 2.04/0294 Украинского государственного фонда фундаментальных исследований.

1. Бовкун В. П., Мень А. В. Интерферометрические наблюдения на декаметровых волнах // Изв. ВУЗов. Радиофизика.—1983.—26, № 11.—С. 1357—1370.
2. Брауде С. Я., Мень А. В. Спектры космических радиоисточников, в которых наблюдается реабсорбция // Докл. АН Украины.—1994.—№ 11.—С. 80—84.
3. Брауде С. Я., Мень А. В. О влиянии космической плазмы на спектры излучения радиоисточников // Докл. АН Украины.—1995.—№ 8.—С. 65—69.
4. Брауде С. Я., Мень А. В. О возможности исследования космической среды с помощью спектральных измерений космических радиоисточников. I // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—13, № 1.—С. 74—81.
5. Володин Ю. В., Губанов А. Г., Дагкесаманский Р. Д. Исследование структуры внегалактических радиоисточников на волне 3,5 м. — М., 1985.—44 с.—(Препринт / ФИАН СССР; № 184).
6. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. — М.: Физмат., 1960.—683 с.
7. Ленг К. Астрофизические формулы. — М.: Мир, 1978.—Ч. 1.—448 с.
8. Мень А. В., Брауде С. Я., Рашковский С. Л. и др. Система декаметровых радиоинтерферометров УРАН. Основные принципы // Радиофизика и радиоастрономия.—1997.—2, № 4.—С. 385—401.
9. Мень А. В., Содин Л. Г., Шарыкин Н. К. и др. Принципы построения и характеристики антенн радиотелескопа УТР-2 // Антенны.—1978.—№ 26.—С. 15—57.
10. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. — М.: Мир, 1973.—957 с.
11. Allen L. R., Anderson B., Conway R. G., et al. Observations of 384 radio sources at a frequency of 158 MHz with a long baseline interferometer // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1962.—124, N 6.—P. 477—499.
12. Bash F. N. Observations of the angular structure of radio sources // Astrophys. J.—1968.—152, N 2.—P. 375—390.
13. Bash F. N. Brightness distributions of radio sources at 2695 MHz // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1968.—16, N 149.—P. 373—404.
14. Clark B. G., Hogg D. E. Radio-source fringe visibilities with an interferometer of 21500-wavelength base line // Astrophys. J.—1966.—145, N 1.—P. 21—35.
15. Fomalont E. B. A catalog of the East-West visibility functions of radio sources at 1425 MHz // Publ. Owens Valley radio observatory.—1967.—1, N 3.—P. 1—69.
16. Hartas J. S., Rees W. G., Scott P. F., et al. Long-baseline interferometry with a portable antenna at 81,5 MHz // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1983.—205.—P. 625—636.
17. Maltby P. Brightness distribution in discrete radio sources. II. Observations with a North-South interferometer // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1962.—7, N 67.—P. 124—140.
18. Maltby P., Moffet A. T. Brightness distribution in discrete radio sources. III. The structure of the sources // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1962.—7, N 67.—P. 141—163.
19. Megn A. V., Braude S. Ya, Rashkovsky S. L., et al. VLBI network URAN and interferometric studies in the decametre waveband // Turkish J. of physics.—1994.—18, N 9.—P. 813—818.
20. Pearson T. J., Perley R. A., Readhead A. C. S. Compact radio sources in the 3C catalog. — Pasadena, California, 1984.—P. 1—35.—(Preprint Owens Valley radio observatory).
21. Pearson T. J., Readhead A. C. S. The milli-arcsecond structure of a complete sample of radio sources. I. VLBI maps of 7 sources. — Pasadena, California, 1980.—P. 1—38.—(Preprint Owens Valley radio observatory)
22. Reid A., Shone D. L., Akujor C. E., et al. High resolution radio maps of quasars from the Jodrell Bank 966 MHz survey // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1995.—110.—P. 213—268.
23. Taylor G. B., Jing-Ping Ge, O'Dea C. P. High Faraday rotation measures of the steep spectrum quasar. 3C216 // Publ. Owens Valley radio observatory.—1995.—26, N 14.—P. 1—21.
24. Wilkinson P. N. Observations of radio sources with an interferometer of 24-km baseline. III. The angular structures at 408 and 1423 MHz of relatively intense radio sources // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1972.—160.—P. 305—319.

Поступила в редакцию 24.05.01