

УДК 524.5-77

А. В. Мень

Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины  
310002 Харьков, ул. Краснознаменная 4

**Космические радиоисточники  
с максимумом спектральной плотности излучения  
в декаметровом диапазоне радиоволн  
(по данным Граковского каталога)**

*На основе данных Граковского каталога исследуются спектральные характеристики космических метагалактических радиоисточников синхротронного излучения, у которых был обнаружен максимум спектральной плотности излучения в декаметровом диапазоне волн. Рассматриваются физические процессы, протекающие в космосе, которые могут приводить к подобному эффекту. В ряде случаев определяются возможные характеристики космической плазмы и угловые размеры радиоисточников.*

*КОСМІЧНІ РАДІОДЖЕРЕЛА З МАКСИМУМОМ СПЕКТРАЛЬНОЇ ГУСТИНИ ВИПРОМІНЮВАННЯ В ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ РАДІОХВИЛЬ (ЗА ДАНИМИ ГРАКІВСЬКОГО КАТАЛОГУ), Мень А. В. — На основі даних Граківського каталогу досліджуються спектральні характеристики космічних метагалактичних радіо джерел з синхротронним випромінюванням, в яких було виявлено максимум спектральної густини випромінювання в декаметровому діапазоні хвиль. Розглядаються фізичні процеси, що відбуваються в космосі, які можуть приводити до подібного ефекту. У ряді випадків визначаються характеристики космічної плазми та кутові розміри радіоджерел.*

*COSMIC RADIO SOURCES WITH MAXIMUM OF THE EMISSION SPECTRAL DENSITY IN THE DECAMETER RANGE OF WAVELENGTHS (ACCORDING TO THE GRAKOVO CATALOGUE), by Megn A. V. — On the basis of the Grakovo catalogue, we discuss the spectral characteristics of metagalactic radio sources of synchrotron radio emission with spectral density maximum in the decameter range of wavelengths. Some physical processes in space which can lead to such an effect are considered. In a number of cases characteristics of cosmic plasma and angular sizes of radio sources are determined.*

Известно, что у большинства космических радиоисточников с синхротронным механизмом излучения распределение спектральной плотности излу-

ния по частоте имеет степенной вид ( $S \sim \nu^{-\alpha}$ , где  $\nu$  — частота,  $\alpha$  — спектральный индекс) в широком интервале частот от сверхвысоких до самых низких, на которых еще можно вести наблюдения с поверхности Земли. Однако в ряде случаев наблюдаются отклонения этих зависимостей от степенного закона (линейного в координатах  $\lg S$  —  $\lg \nu$ ), вызванные различными физическими процессами, протекающими в космосе. К таким процессам относятся прежде всего самопоглощение синхротронного излучения (синхротронная реабсорбция), поглощение излучения в областях космической плазмы, расположенной на трассе распространения радиоволн, или в плазме, находящейся в самом излучающем объекте. Подобный эффект может быть вызван тем, что из-за наличия плазмы в излучающем объекте коэффициент преломления среды меньше единицы, и фазовая скорость излучения превышает скорость движения космических электронов. Это приводит к уменьшению направленности синхротронного излучения с понижением частоты, и тем самым — к ослаблению его интенсивности (эффект Разина — Цытовича). К аналогичному результату может приводить также отклонение энергетического спектра релятивистских электронов от степенного закона, в частности обрыв этого спектра в области низких энергий, и другие процессы. В этих случаях зависимости спектральной плотности от частоты, естественно, могут содержать информацию о происходящих физических процессах и помочь установить тот, который привел к искажению степенной зависимости  $S(\nu)$ .

Ниже мы исследуем возможное влияние четырех упомянутых выше физических механизмов на зависимость  $S(\nu)$ . Для рассмотрения использованы те радиоисточники Граковского каталога [11—16], у которых может наблюдаться максимум спектральной плотности излучения  $S_{\max}$  на частоте  $\nu_{\max} < 30$  МГц, ниже которой спектральная плотность излучения уменьшается при дальнейшем понижении частоты.

Граковский каталог содержит информацию о спектральных плотностях излучения 2237 радиоисточников северного неба, измеренных на частотах  $\nu = 25, 20, 16.7, 14, 7, 12, 6$  и 10 МГц. Обзор неба проводился с помощью декаметрового радиотелескопа УТР-2 [8], расположенного вблизи с. Граково (Харьковская область). Следует отметить, что даже для УТР-2, самого большого в мире радиотелескопа в декаметровом диапазоне (эффективная площадь около 150 000 м<sup>2</sup>) с наилучшим угловым разрешением (около 0.5° на частоте 25 МГц при приеме из зенита) наблюдения были сопряжены с большими трудностями. Это связано с очень существенным влиянием аддитивных и мультипликативных помех от радиовещательных и других коротковолновых станций, и большого разброса спектральной плотности излучения принимаемых сигналов из-за влияния космической плазмы и ионосферы Земли. Поэтому данные этого обзора в ряде случаев были сопряжены с существенными ошибками. Влияние этих помех существенно возрастало с понижением частоты, поэтому наиболее достоверные данные были получены для максимальных частот каталога 25 и 20 МГц.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

На основе данных Граковского каталога (GR) в широком секторе северного неба (склонения от  $-13^\circ$  до  $+60^\circ$ , за исключением интервала  $20^\circ \leq \delta \leq 30^\circ$ , где подробные данные пока не опубликованы), были обнаружены 142 космических радиоисточника с максимумом спектральной плотности излу-

Таблица 1. Распределение по склонению  $\delta$  общего количества  $N$  радиоисточников Северного неба, обнаруженных в Граковском каталоге, и количества  $N_D$  радиоисточников, у которых наблюдается экстремум спектральной плотности излучения в декаметровом диапазоне

$\delta$	$N$	$N_D$
$-13^\circ \dots -2^\circ$	316	41 (33)*
$0^\circ \dots 10^\circ$	364	24 (19)*
$10^\circ \dots 20^\circ$	329	34 (11)*
$30^\circ \dots 40^\circ$	483	12 (29)*
$41^\circ \dots 52^\circ$	432	6 (8)*
$52^\circ \dots 60^\circ$	313	25 (11)*

Таблица 2. Координаты выбранных радиоисточников и спектральные плотности излучения на частоте 25 МГц

Радиоисточник	$\alpha$			$\delta$	$S_{25\text{МГц}}, \text{ Ян}$
GR 0419-08	4 <sup>h</sup>	19 <sup>m</sup>	14 <sup>s</sup>	-8.99	37
GR 0705-07	7	5	34	-7.72	52
GR 0832-07	8	32	45	-7.32	95
GR 0947-07	9	47	1	-7.64	44
GR 1008-07	10	8	36	-7.25	67
GR 1126-06	11	26	5	-6.96	86
GR 1342-02	13	42	59	-2.6	40
GR 1359-06	13	59	7	-6.31	50
GR 1520-05	15	20	4	-5.1	56
GR 2106-06	21	6	19	-6.77	45

чения в декаметровом диапазоне. Ниже частоты максимума  $\nu_m$  спектральная плотность излучения падает (так называемые спектральные характеристики с отрицательной кривизной). Распределение числа таких радиоисточников в зависимости от области наблюдения по склонению приведено в табл. 1.

Звездочкой в табл. 1 отмечены 111 радиоисточников с предполагаемой зависимостью спектральной плотности от частоты с экстремумом на частотах  $\nu < 30$  МГц на основании данных наблюдений только на 25 и 20 МГц, где велись наиболее точные измерения. Таким образом, около 6.3 % от общего числа наблюдаемых радиоисточников имеют зависимость  $S(\nu)$  с максимумом спектральной плотности излучения, лежащим в декаметровом диапазоне, и примерно в 5 % случаев такую зависимость можно предполагать.

Как показано в работах [1, 7], для радиоисточников с такой аномалией спектра можно в ряде случаев установить тот физический процесс, который может приводить к появлению экстремума на спектральной зависимости.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

На рис. 1—3 приведены наблюдаемые и теоретические зависимости спектральной плотности от частоты для 10 космических радиоисточников Граковского каталога в области  $-10^\circ < \delta < 0^\circ$ , координаты которых приведены в табл. 2. Определенные экспериментально значения  $S(\nu)$  для каждого радиоисточника приведены на рисунках сплошной линией 1 в интервале частот, где проводились измерения, и штриховой — вне этого интервала. Здесь же

крестиками нанесены измеренные значения спектральной плотности излучения на частотах  $\nu = 20, 16, 7$  и  $14.7$  МГц и их средние квадратичные отклонения. Расчетные зависимости  $S(\nu)$  для четырех различных механизмов затухания излучения нанесены кривыми 2—5.

*Зависимость 2* рассчитывалась с учетом механизма затухания излучения в однородной и изотропной плазме, находящейся в самом излучаемом объекте, по формуле [1]

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

где

$$D = \frac{\alpha(1 - e^{-\tau_0})}{1 - e^{-\tau_0} - \tau_0 e^{-\tau_0}} - 2.$$

При этом электронная температура  $T_e$  и мера эмиссии плазмы  $N_e^2 L$  определяются согласно [2, 3] из выражений

$$T_e = e^{(B-17.7)/1.5}, \quad (2)$$

$$N_e^2 L = \frac{AT_e^{3/2}}{9.8 \cdot 10^{-3}},$$

где

$$B = \frac{1}{D} + \ln(\nu_m \cdot 10^6),$$

$$A = \tau_0(\nu_m \cdot 10^6)^2 \cdot D.$$

*Зависимость 3* рассчитывалась с учетом синхротронной реабсорбции в радиоисточнике в соответствии с [1]:

$$\frac{S(\nu)}{S_m} = \left(\frac{\nu}{\nu_m}\right)^{5/2} \frac{1 - e^{-\tau_{01}(\nu/\nu_m)^{-\alpha-5/2}}}{1 - e^{-\tau_{01}}}, \quad (3)$$

При этом угловой размер  $\theta_0$  радиоисточника в секундах дуги согласно [2] составляет

$$\theta_0 \sim S_m^{1/2} \nu_m^{-5/4} H_{\perp}^{1/4} (1 - e^{-\tau_0})^{-1/2} (1 + Z)^{1/4}.$$

Здесь  $H_{\perp}$  — поперечная к направлению движения релятивистских электронов составляющая напряженности магнитного поля в микроэрстедах ( $1 \text{ мкЭ} = 79.5775 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}$ ),  $Z$  — красное смещение,  $S_m$  — в янских,  $\nu_m$  — в МГц. Минимальное и максимальное значения  $\theta_0$  соответствуют изменению  $H_{\perp}$  от 10 до 10000 мкЭ и  $Z$  от 0.1 до 3, а наиболее вероятное значение  $\theta_0$  соответствует значениям  $H_{\perp} = 150 \text{ мкЭ}$  и  $Z = 0.5$ .

*Зависимость 4* рассчитана согласно [1] для случая затухания излучения в области однородной и изотропной плазмы, расположенной на трассе распространения радиоволн:

$$\ln \frac{S(\nu)}{S_m} = \alpha \ln \frac{\nu_m}{\nu} + \frac{\alpha}{2 + D_1} \left[ 1 - \left(\frac{\nu_m}{\nu}\right)^2 \left(1 + D_1 \ln \frac{\nu_m}{\nu}\right) \right], \quad (4)$$

где

$$D_1 = \frac{\alpha}{\tau_{02}} - 2.$$

Электронная температура и мера эмиссии, соответствующие зависимости 4,

определялись на основании (2), но при  $A = (\alpha - 2\tau_{02})(\nu_m \cdot 10^6)^2$ .

Зависимость 5 определена при учете эффекта Разина — Цытовича [4, 9, 10] на основании [1]:

$$\ln \frac{S(\nu)}{S_m} = \alpha \ln \left( \frac{\nu_m}{\nu} \right) + \frac{\alpha}{\beta} \left[ 1 - \left( \frac{\nu_m}{\nu} \right)^\beta \right]. \quad (5)$$

При этом может быть определена величина  $\frac{N_e}{H_\perp}$  [1]:

$$\frac{N_e}{H_\perp} = \frac{\nu_m \cdot 10^6}{14.4 f_m},$$

$$f_m^\beta = \frac{\xi \beta}{\alpha},$$

где параметры  $\beta$  и  $\xi$ , зависящие от  $\alpha$ , определяются из таблицы, приведенной в работе [1].

В табл. 3 приведены основные параметры расчета и физические характеристики плазмы и угловые размеры радиоисточников для четырех рассмотренных выше механизмов затухания излучения на низких частотах. Здесь  $\alpha$  — спектральный индекс экспериментальной зависимости спектральной плотности излучения  $S(\nu)$  на частотах  $\nu \gg \nu_m$ ,  $N_e$  — плотность электронов при поглощении излучения в плазме при размерах поглощающей области  $L > 1$  пк,  $N_e$  — при учете эффекта Разина — Цытовича — электронная плотность при величине поперечной к направлению движения релятивистских электронов составляющей напряженности магнитного поля  $H_\perp > 1$  мкЭ.

**1. Радиоисточник GR 0419-08.** Как следует из соответствующего рисунка, расчетные зависимости  $S(\nu)$  при учете затухания излучения в плазме, расположенной в самом радиоисточнике, а также при учете эффекта Разина — Цытовича (кривые 2 и 5) явно не согласуются с экспериментальными данными. Заметим также, что в первом случае электронная температура плазмы оказывается слишком низкой: такая температура не наблюдается в космосе. Кроме того, должны быть слишком большие плотности электронов. Расчеты  $S(\nu)$  при двух других механизмах затухания излучения не противоречат данным эксперимента, но однозначный выбор среди них пока невозможен. Для этого необходимы дополнительные измерения на частотах  $\nu < 12.6$  МГц, которые пока не проводились. Тем не менее, учитывая очень низкую электронную температуру плазмы, соответствующую расчету  $S(\nu)$  при учете затухания излучения в плазме, расположенной на трассе распространения волн, предпочтительным является эффект синхротронной реабсорбции. Подтверждением такого предположения могли бы явиться непосредственные измерения углового размера этого радиоисточника на высоких частотах ( $\nu \gg 30$  МГц).

**2. Радиоисточник GR 0705-07.** Видно, что зависимости 2 и 5 явно не согласуются с данными эксперимента, которые лучше соответствуют кривым 3 и 4, т. е. наиболее вероятно, что в этом объекте имеет место реабсорбция либо существенно затухание излучения в плазме, расположенной на трассе распространения волн. Для более надежного заключения необходимы непосредственные измерения углового размера радиоисточника либо измерения спектральной плотности излучения на частотах ниже 12.6 МГц. Заметим также, что величина электронной температуры  $T_e$  при

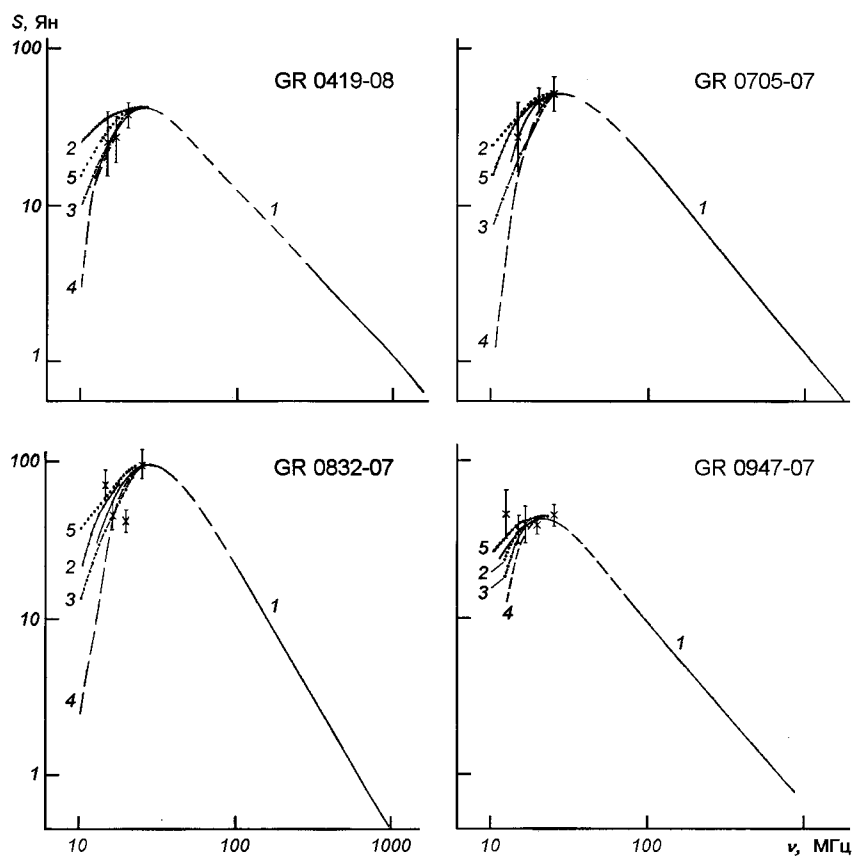


Рис. 1. Экспериментальная (1) и расчетные зависимости спектральной плотности излучения от частоты радиосточников GR 0419-08, GR 0705-07, GR 0832-07, GR 0947-07 при учете затухания в плазме, находящейся в самом излучающем объекте (кривая 2), при синхротронной реабсорбции (кривая 3), при затухании излучения в плазме, расположенной на трассе распространения радиоволн (кривая 4) и при учете эффекта Разина — Цытовича (кривая 5)

учете затухания в плазме в обоих рассмотренных случаях оказывается очень низкой ( $< 3$  К). Однако в случае учета затухания в плазме, расположенной на трассе распространения радиоволн, при уменьшении величины  $\nu_m$  от 28.8 до 26 МГц, что учитывая погрешности эксперимента нельзя полностью исключить, расчетная величина  $T_e$  увеличивается до 16 К.

**3. Радиосточник GR 0832-07.** Эксперименту, хотя и очень приближенно из-за большого разброса данных, наиболее соответствуют зависимости 3 и 4 (реабсорбция и затухание излучения в плазме, находящиеся на трассе распространения волн), но отдавать предпочтение одному из этих физических механизмов без дополнительных измерений  $\theta_0$  или  $S(\nu)$  на более низких частотах пока не представляется возможным. Электронная температура плазмы при учете затухания излучения в плазме оказывается очень низкой  $T_e \sim 1$  К (табл. 3). Однако следует отметить, что при изменении величины  $\nu_m$  от 27.5 до 24 МГц, что не исключается, величина  $T_e$  при учете затухания в плазме, расположенной на трассе распространения, увеличивается до 350 К.

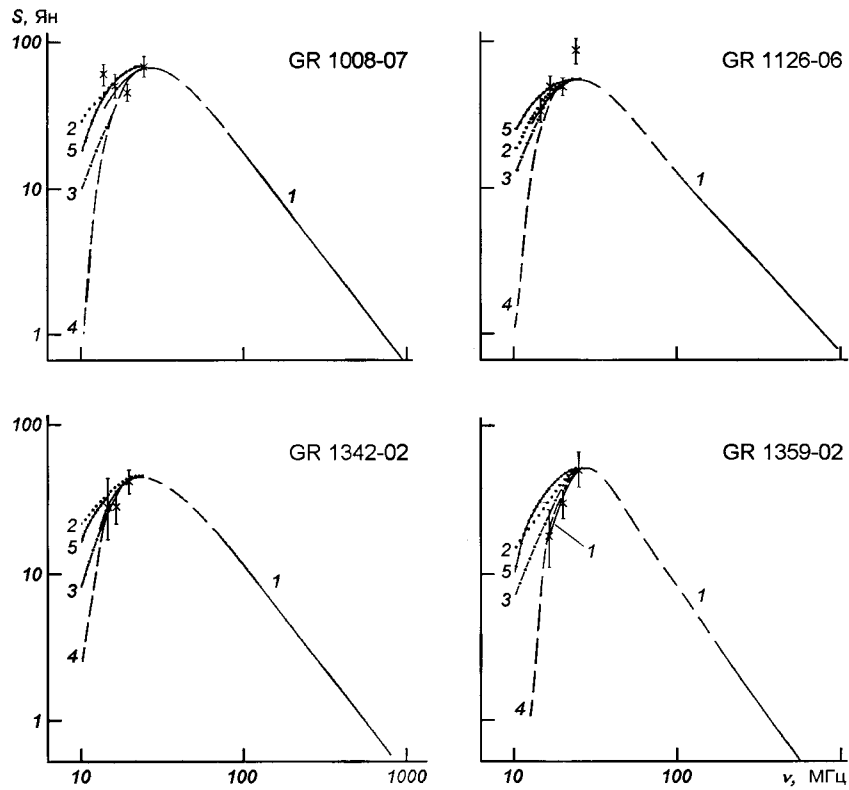


Рис. 2. То же для радиоисточников GR 1008-07, GR 1126-06, GR 1342-02, GR 1359-06

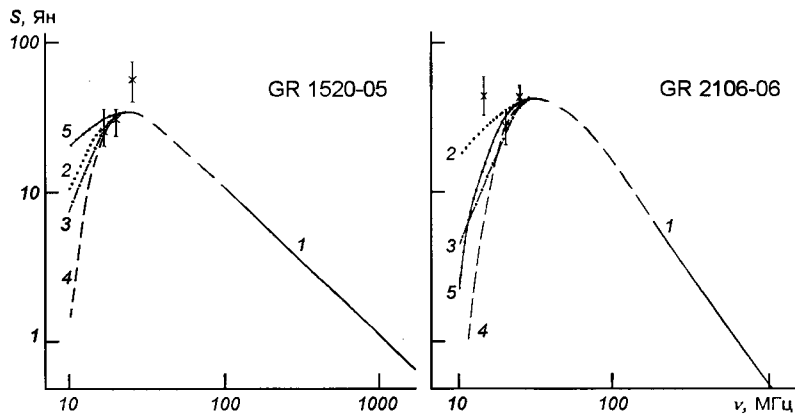


Рис. 3. То же для радиоисточников GR 1520-05 и GR 2106-06

**4. Радиоисточник GR 0947-07.** Согласно рисунку экспериментальным данным в этом случае лучше всего соответствует кривая 2, рассчитанная при учете затухания излучения в плазме, находящейся в самом излучающем объекте. Температура плазмы в этом объекте оказывается очень низкой  $T_e \sim 0.7$  К, причем изменением  $\nu_m < 23$  МГц в допустимых пределах она не увеличивается больше чем до 0.9 К.

Таблица 3. Основные параметры расчета и физические характеристики среды при четырех физических механизмах затухания излучения 10 космических радиоисточников

Радиоисточник	Затухание в плазме, находящейся в самом радиоисточнике	Затухание, связанное с синхротронной реабсорбцией	Затухание в плазме на пути распространения радиоволн	Затухание, связанное с эффектом Раина—Цытовича
GR 0419-08 $\nu_m = 24$ МГц $S_m = 42$ Ян $\alpha = 1.06$	$\tau_0 = 0.61$ $D = 1.84$ $B = 17.54$ $A = 6.5 \cdot 10^{14}$ $T_e = 0.9$ К $N_e^2 L = 0.018 \text{ см}^{-6} \text{ ПК}$ $N_e < 0.135 \text{ см}^{-3}$	$\tau_{01} = 0.67$ $0.3'' \leq \theta_0 \leq 2.5''$ $\theta_{\text{овер}} = 0.7''$	$\tau_{02} = 0.29$ $D_1 = 1.64$ $B = 17.6$ $A = 2.75 \cdot 10^{14}$ $T_e = 0.9$ К $N_e^2 L = 0.008 \text{ см}^{-6} \text{ ПК}$ $N_e < 0.09 \text{ см}^{-3}$	$\beta = 1.04$ $\xi = 2.59$ $N_e/H_{\perp} =$ $= 0.7 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}/\text{Э}$ $N_e > 0.7 \text{ см}^{-3}$
GR 0705-07 $\nu_m = 28.8$ МГц $S_m = 52.5$ Ян $\alpha = 1.22$	$\tau_0 = 0.95$ $D = 0.47$ $B = 19.3$ $A = 3.7 \cdot 10^{14}$ $T_e = 2.9$ К $N_e^2 L = 0.047 \text{ см}^{-6} \text{ ПК}$ $N_e < 0.2 \text{ см}^{-3}$	$\tau_{01} = 0.75$ $0.27'' \leq \theta_0 \leq 2.1''$ $\theta_{\text{овер}} = 0.58''$	$\tau_{02} = 0.44$ $D_1 = 0.79$ $B = 18.4$ $A = 2.9 \cdot 10^{14}$ $T_e = 1.6$ К $N_e^2 L = 0.02 \text{ см}^{-6} \text{ ПК}$ $N_e < 0.14 \text{ см}^{-3}$	$\beta = 1.2$ $\xi = 2.59$ $N_e/H_{\perp} =$ $= 0.9 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}/\text{Э}$ $N_e > 0.9 \text{ см}^{-3}$
GR 0832-07 $\nu_m = 27.5$ МГц $S_m = 95.5$ Ян $\alpha = 1.6$	$\tau_0 = 1.17$ $D = 1.38$ $B = 17.9$ $A = 12 \cdot 10^{14}$ $T_e = 1.1$ К $N_e^2 L = 0.047 \text{ см}^{-6} \text{ ПК}$ $N_e < 0.22 \text{ см}^{-3}$	$\tau_{01} = 0.92$ $0.36'' \leq \theta_0 \leq 2.8''$ $\theta_{\text{овер}} = 0.77''$	$\tau_{02} = 0.53$ $D_1 = 1.02$ $B = 18.1$ $A = 4.1 \cdot 10^{14}$ $T_e = 1.3$ К $N_e^2 L = 0.02 \text{ см}^{-6} \text{ ПК}$ $N_e < 0.14 \text{ см}^{-3}$	$\beta = 1.28$ $\xi = 2.58$ $N_e/H_{\perp} =$ $= 1.08 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}/\text{Э}$ $N_e > 1.08 \text{ см}^{-3}$
GR 0947-07 $\nu_m = 23$ МГц $S_m = 43$ Ян $\alpha = 1.16$	$\tau_0 = 0.42$ $D = 3.95$ $B = 17.2$ $A = 8.7 \cdot 10^{14}$ $T_e = 0.7$ К $N_e^2 L = 0.018 \text{ см}^{-6} \text{ ПК}$ $N_e < 0.13 \text{ см}^{-3}$	$\tau_{01} = 0.72$ $0.33'' \leq \theta_0 \leq 2.6''$ $\theta_{\text{овер}} = 0.71''$	$\tau_{02} = 0.2$ $D_1 = 3.75$ $B = 17.2$ $A = 3.9 \cdot 10^{14}$ $T_e = 0.7$ К $N_e^2 L = 0.008 \text{ см}^{-6} \text{ ПК}$ $N_e < 0.09 \text{ см}^{-3}$	$\beta = 1.09$ $\xi = 2.59$ $N_e/H_{\perp} =$ $= 0.7 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}/\text{Э}$ $N_e > 0.7 \text{ см}^{-3}$
GR 1008-07 $\nu_m = 26.9$ МГц $S_m = 66$ Ян $\alpha = 1.46$	$\tau_0 = 1.29$ $D = 0.86$ $B = 18.3$ $A = 8.1 \cdot 10^{14}$ $T_e = 1.5$ К $N_e^2 L = 0.047 \text{ см}^{-6} \text{ ПК}$ $N_e < 0.22 \text{ см}^{-3}$	$\tau_{01} = 0.86$ $0.32'' \leq \theta_0 \leq 2.5''$ $\theta_{\text{овер}} = 0.68''$	$\tau_{02} = 0.58$ $D_1 = 0.53$ $B = 19$ $A = 2.4 \cdot 10^{14}$ $T_e = 2.4$ К $N_e^2 L = 0.028 \text{ см}^{-6} \text{ ПК}$ $N_e < 0.17 \text{ см}^{-3}$	$\beta = 1.26$ $\xi = 2.58$ $N_e/H_{\perp} =$ $= 1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}/\text{Э}$ $N_e > 1 \text{ см}^{-3}$
GR 1126-06 $\nu_m = 25$ МГц $S_m = 53.7$ Ян $\alpha = 1.23$	$\tau_0 = 0.69$ $D = 2.05$ $B = 17.5$ $A = 8.8 \cdot 10^{14}$ $T_e = 0.9$ К $N_e^2 L = 0.024 \text{ см}^{-6} \text{ ПК}$ $N_e < 0.16 \text{ см}^{-3}$	$\tau_{01} = 0.75$ $0.33'' \leq \theta_0 \leq 2.6''$ $\theta_{\text{овер}} = 0.7''$	$\tau_{02} = 0.32$ $D_1 = 1.82$ $B = 17.58$ $A = 3.66 \cdot 10^{14}$ $T_e = 0.9$ К $N_e^2 L = 0.01 \text{ см}^{-6} \text{ ПК}$ $N_e < 0.1 \text{ см}^{-3}$	$\beta = 1.13$ $\xi = 2.59$ $N_e/H_{\perp} =$ $= 0.81 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}/\text{Э}$ $N_e > 0.8 \text{ см}^{-3}$
GR 1342-02 $\nu_m = 25$ МГц $S_m = 43.7$ Ян $\alpha = 1.4$	$\tau_0 = 1.35$ $D = 0.65$ $B = 18.6$ $A = 5.52 \cdot 10^{14}$ $T_e = 1.8$ К $N_e^2 L = 0.044 \text{ см}^{-6} \text{ ПК}$ $N_e < 0.21 \text{ см}^{-3}$	$\tau_{01} = 0.83$ $0.29'' \leq \theta_0 \leq 2.2''$ $\theta_{\text{овер}} = 0.6''$	$\tau_{02} = 0.6$ $D_1 = 0.33$ $B = 20.37$ $A = 1.25 \cdot 10^{14}$ $T_e = 6$ К $N_e^2 L = 0.06 \text{ см}^{-6} \text{ ПК}$ $N_e < 0.25 \text{ см}^{-3}$	$\beta = 1.23$ $\xi = 2.58$ $N_e/H_{\perp} =$ $= 0.89 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}/\text{Э}$ $N_e > 0.89 \text{ см}^{-3}$



Окончание табл. 3

Радиоисточник	Затухание в плазме, находящейся в самом радиоисточнике	Затухание, связанное с синхротронной реабсорбцией	Затухание в плазме на пути распространения радиоволн	Затухание, связанное с эффектом Раизина—Цытовича
GR 1359-06 $\nu_m = 27.5$ МГц $S_m = 51.3$ Ян $\alpha = 1.58$	$\tau_0 = 0.53$ $D = 4.54$ $B = 17.35$ $A = 18.2 \cdot 10^{14}$ $T_e = 0.8$ К $N_e^2 L = 0.043 \text{ см}^{-6} \text{ пк}$ $N_e < 0.21 \text{ см}^{-3}$	$\tau_{01} = 0.91$ $0.27'' \leq \theta_0 \leq 2.1''$ $\theta_{\text{верх}} = 0.57''$	$\tau_{02} = 0.25$ $D_1 = 4.32$ $B = 17.36$ $A = 8.17 \cdot 10^{14}$ $T_e = 0.8$ К $N_e^2 L = 0.02 \text{ см}^{-6} \text{ пк}$ $N_e < 0.14 \text{ см}^{-3}$	$\beta = 1.33$ $\xi = 2.57$ $N_e/H_{\perp} =$ $= 1.07 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}/\text{Э}$ $N_e > 1.07 \text{ см}^{-3}$
GR 1520-05 $\nu_m = 25$ МГц $S_m = 33.9$ Ян $\alpha = 0.98$	$\tau_0 = 0.43$ $D = 2.91$ $B = 17.38$ $A = 7.8 \cdot 10^{14}$ $T_e = 0.8$ К $N_e^2 L = 0.02 \text{ см}^{-6} \text{ пк}$ $N_e < 0.14 \text{ см}^{-3}$	$\tau_{01} = 0.63$ $0.28'' \leq \theta_0 \leq 2.2''$ $\theta_{\text{верх}} = 0.59''$	$\tau_{02} = 0.21$ $D_1 = 2.67$ $B = 17.4$ $A = 3.5 \cdot 10^{14}$ $T_e = 0.8$ К $N_e^2 L = 0.009 \text{ см}^{-6} \text{ пк}$ $N_e < 0.09 \text{ см}^{-3}$	$\beta = 1.01$ $\xi = 2.61$ $N_e/H_{\perp} =$ $= 0.65 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}/\text{Э}$ $N_e > 0.65 \text{ см}^{-3}$
GR 2106-06 $\nu_m = 31.6$ МГц $S_m = 47.9$ Ян $\alpha = 1.54$	$\tau_0 = 1.59$ $D = 0.604$ $B = 18.92$ $A = 9.56 \cdot 10^{14}$ $T_e = 2.3$ К $N_e^2 L = 0.11 \text{ см}^{-6} \text{ пк}$ $N_e < 0.33 \text{ см}^{-3}$	$\tau_{01} = 0.9$ $0.22'' \leq \theta_0 \leq 1.7''$ $\theta_{\text{верх}} = 0.47''$	$\tau_{02} = 0.69$ $D_1 = 0.23$ $B = 21.6$ $A = 1.6 \cdot 10^{14}$ $T_e = 13$ К $N_e^2 L = 0.248 \text{ см}^{-6} \text{ пк}$ $N_e < 0.5 \text{ см}^{-3}$	$\beta = 1.56$ $\xi = 2.58$ $N_e/H_{\perp} =$ $= 1.19 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}/\text{Э}$ $N_e > 1.2 \text{ см}^{-3}$

5. Радиоисточник GR 1008-07. Для этого радиоисточника из-за большого разброса экспериментальных данных и отсутствия измерений  $S(\nu)$  на низких частотах ( $\nu \leq 12.6$  МГц) установить однозначно физический механизм, ответственный за падение спектральной плотности излучения на частотах  $\nu < 26.9$  МГц, пока не представляется возможным. Заметим, что хотя при  $\nu_m = 26.9$  МГц величина  $T_e$  при затухании в плазме оказывается равной 1.5—2.5 К, при учете затухания в плазме, расположенной на трассе распространения волн, при уменьшении  $\nu_m$  до 25 МГц величина  $T_e$  увеличивается до 275 К.

6. Радиоисточник GR 1126-06. Для этого объекта экспериментальным данным лучше всего соответствует зависимость 2, рассчитанная при учете затухания излучения в плазме, находящейся в самом радиоисточнике. Остальные расчетные зависимости, особенно 4 и 5, явно не согласуются с данными эксперимента. Однако при учете затухания в плазме величина  $T_e$  оказывается очень низкой ( $T_e \sim 0.9$  К), и при изменениях  $\nu_m$  в допустимых пределах она не увеличивается больше 1.4 К.

7. Радиоисточник GR 1342-02. Экспериментальным данным соответствуют зависимости 3 и 4 (реабсорбция и затухание излучения в плазме, находящейся на трассе распространения волн), причем отдать предпочтение одному из этих процессов пока нельзя без дополнительных измерений на низких частотах ( $\nu \leq 12.6$  МГц). Отметим, однако, что хотя электронная температура  $T_e = 6$  К, соответствующая зависимости 4, ниже температуры холодной плазмы, обнаруженной в космосе при наблюдении рекомбинаци-

онных линий ионизованного углерода C II [16], где  $20 \text{ К} \leq T_e \leq 100 \text{ К}$  и  $0.1 \leq N_e \leq 0.3 \text{ см}^{-3}$ , в нашем случае при уменьшении  $\nu_m$  от 25 до 24 МГц, что вполне возможно, учитывая точность определения  $\nu_m$ , расчетная величина  $T_e$  становится равной 31 К, что согласуется с [5].

**8. Радиоисточник GR 1359-02.** Экспериментальная зависимость  $S(\nu)$  в этом случае хорошо согласуется с расчетной кривой 4, определенной при учете затухания излучения в плазме, расположенной на трассе распространения радиоволн, и хуже с расчетом при учете реабсорбции. Расчетные зависимости  $S(\nu)$  при учете остальных двух механизмов затухания излучения (кривые 2 и 5) явно не соответствуют экспериментальным данным.

**9. Радиоисточник GR 1520-05.** Расчет при учете эффекта Разина — Цытовича явно не согласуется с экспериментальной зависимостью  $S(\nu)$ . Лучше всего экспериментальным данным соответствует расчетная зависимость  $S(\nu)$ , проведенная при учете реабсорбции в объекте (кривая 3), однако расчеты  $S(\nu)$  при учете затухания в плазме, находящейся в радиоисточнике или трассе распространения волн, также не противоречат данным эксперимента. Отметим, что при учете затухания излучения в плазме, расположенной на трассе распространения волн, в этом случае при  $\nu_m = 25 \text{ МГц}$  электронная температура плазмы оказывается низкой ( $T_e = 0.8 \text{ К}$ ), однако при частотах  $\nu_m = 20 \text{ МГц}$  величина  $T_e$  увеличивается до 18 К. Однозначно определить физический механизм, ответственный за экстремум на экспериментальной зависимости спектральной плотности излучения от частоты можно будет после измерений  $S(\nu)$  на более низких частотах ( $\nu \leq 12.6 \text{ МГц}$ ) или после непосредственного определения углового размера этого радиоисточника на высоких частотах.

**10. Радиоисточник GR 2106-06.** Из-за большого разброса данных измерений в этом случае пока нельзя отдать предпочтение одной из двух расчетных зависимостей  $S(\nu)$  — при учете эффекта реабсорбции или затухания излучения в плазме, находящейся на трассе распространения радиоволн (кривые 3 и 4). Несколько хуже результатам измерений соответствует расчетная зависимость при учете эффекта Разина — Цытовича (кривая 5) и явно не соответствует кривая 2, определенная при учете затухания в плазме, находящейся в самом излучаемом объекте. Заметим, что при учете затухания в плазме, расположенной на трассе распространения волн при  $\nu_m = 31.6 \text{ МГц}$  электронная температура плазмы  $T_e$  оказывается равной 13 К, однако при уменьшении  $\nu_m$  до 30.2 МГц величина  $T_e$  увеличивается до 320 К.

#### ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные в качестве примера результаты для 10 радиоисточников являются типичными при использовании данных Граковского каталога. Прежде всего надо отметить, что все эти результаты являются предварительными и требуют последующего уточнения. Достоверным на основании данных Граковского каталога является факт установления радиоисточников, у которых максимум спектральной плотности излучения находится в области декаметровых волн — радиоисточники с отрицательным спектральным индексом ( $S(\nu) \sim \nu^{-\alpha}$ ) в интервале частот  $\nu < 30 \text{ МГц}$ . Это объясняется методикой составления этого первого в декаметровом диапазоне волн каталога спектральных плотностей излучения на ряде частот декаметрового

диапазона, вплоть до самых низких, на которых еще можно принять излучение из космоса с помощью инструментов, расположенных на поверхности Земли. Поскольку при составлении Граковского каталога необходимо было в сжатые сроки провести обзор северного неба для обнаружения и идентификации максимально возможного количества дискретных радиоисточников, на определение величины спектральных плотностей излучения не выделялось достаточного времени. Обычно каждый радиоисточник при составлении этого каталога наблюдался от 5 до 10 раз, в то время как из-за различных помех для достаточно точных измерений требовалось примерно в 10 раз большее время, особенно при наблюдениях на самых низких частотах 12.6 и 10 МГц. Поэтому наиболее достоверные данные приведены в Граковском каталоге для 25 и 20 МГц. При дальнейшем понижении частоты погрешности измерений существенно возрастали, и на самых низких частотах данные вообще могли отсутствовать.

В то же время при применении приведенной методики определения физических процессов в космосе, которые ответственны за наблюдаемые в эксперименте максимумы спектральной плотности излучения на зависимостях  $S(\nu)$ , наиболее информативными являются как раз данные, полученные на самых низких частотах  $\nu \ll \nu_m$ . При применении такой методики в случаях, когда частота  $\nu_m$  находится в метровом или более коротковолновом диапазоне, это не существенно, так как при этом точность измерений спектральных плотностей излучения практически одна и та же на всех частотах наблюдений.

По этой причине физические процессы в космосе, приводящие к зависимостям  $S(\nu)$  с экстремумом спектральной плотности излучения в декаметровом диапазоне, однозначно определены не для всех наблюдавшихся объектов. Установлен эффект реабсорбции для радиоисточников GR 0419-08 и GR 1520-05, влияние затухания излучения в плазме, находящейся в самих радиоисточниках GR 0947-07 и GR 1126-06, затухание излучения в плазме, находящейся на трассе распространения волн для радиоисточника GR 1359-06. Для нескольких из приведенных радиоисточников (GR 0832-07, GR 1008-07, GR 1342-02 и GR 2106-06) нельзя пока установить влияние на вид зависимостей  $S(\nu)$  одного из двух физических механизмов — реабсорбции или затухания излучения в плазме, расположенной на трассе распространения волн. Однако во всех рассмотренных случаях удается указать на те физические процессы в космосе, которые не влияют на вид зависимости  $S(\nu)$  для каждого радиоисточника. В частности, влияние эффекта Разина — Цытовича не наблюдалось для всех исследованных объектов. Как показано в работе [7], максимум излучения, связанный с этим эффектом, может наблюдаться скорее всего на гектаметровых волнах, и вряд ли может быть обнаружен при измерениях с поверхности Земли, за исключением объектов с очень высокой электронной плотностью либо очень малым магнитным полем.

Как следует из табл. 3, электронная температура плазмы  $T_e$  при учете затухания излучения в плазме оказывается, как правило, очень низкой (порядка 1 К) при указанных в таблице значениях  $\nu_m$  для каждого радиоисточника. Заметим, что при определении  $T_e$  величина  $\nu_m$  оказывается наиболее существенной, и при уменьшении  $\nu_m$  на 1—2 МГц значение  $T_e$  может резко увеличиться, особенно при учете затухания излучения в плазме, расположенной на трассе распространения волн. В табл. 3 для всех объектов приведены максимально возможные с учетом экспериментальных данных величины  $\nu_m$ , т. е. значения  $T_e$  табл. 3 являются фактически

минимальными оценками. Для более точного определения величины  $T_e$  приведенной методикой необходимо определять  $\nu_m$  с точностью порядка 0.1 МГц, что на основе данных Граковского каталога практически невозможно, так как погрешность определения  $\nu_m$  на порядок больше.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, приведенные в Граковском каталоге данные о спектральных плотностях излучения космических радиоисточников Северного неба в декаметровом диапазоне волн ( $\nu < 30$  МГц) позволили однозначно определить сравнительно большое количество объектов, у которых на спектральных характеристиках  $S(\nu)$  наблюдаются максимумы спектральной плотности излучения в декаметровом диапазоне волн. Путем сравнения экспериментальных зависимостей  $S(\nu)$  с расчетными, учитывающими различные физические процессы в космосе, которые могут вызвать затухание излучения, в принципе можно определить, какой из этих процессов влияет в каждом конкретном случае. Однако при этом необходимы измерения спектральных плотностей излучения с достаточно высокой точностью, которая не всегда достижима, особенно в декаметровом диапазоне волн. Как показано в работе [6], при применении использованной методики определения электронной температуры плазмы особенно большие ошибки имеют место при малых значениях параметра  $D$  ( $0 < D \ll 1$ ), когда оценка  $T_e$  достигает сотен и тысяч градусов Кельвина, и наоборот, малые ошибки отмечаются при значениях  $D \geq 1$ , однако при этом  $T_e \ll 10$  К. Это принципиально ограничивает применение рассматриваемой методики для достаточно точного определения электронной температуры космической плазмы.

1. 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.
2. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. — М.: Физмат., 1960.—683 с.
3. Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И. Происхождение космических лучей. — М.: Изд-во АН СССР, 1963.—384 с.
4. Каплан С. А., Пикельнер С. Б. Физика межзвездной среды. — М.: Наука, 1979.—591 с.
5. Коноваленко А. А. Наблюдения рекомбинационных линий углерода на декаметровых волнах в направлении источника Кассиопея А // Письма в Астрон. журн.—1984.—10, № 11.—С. 846—853.
6. Мень А. В. К вопросу о спектральных характеристиках излучения компонентов модели распределения яркости радиогалактики 3С234 // Астрон. журн.—81, № 5.—С. 411—417.
7. Мень А. В., Брауде С. Я. О возможности исследования космической среды с помощью спектральных измерений космических радиоисточников. II // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—13, № 1.—С. 82—95.
8. Мень А. В., Содин Л. Г., Шарыкин Н. К. и др. Принципы построения и характеристики антенн радиотелескопа УТР-2 // Антенны / Под ред. А. А. Пистолькорса. — М.: Связь, 1978.—26.—С. 15—57.
9. Разин В. А. К теории спектров радиоизлучения дискретных источников на частотах ниже 30МГц // Изв. вузов. Радиофизика.—1960.—3, № 4.—С. 584—594.
10. Разин В. А. О спектре нетеплового космического радиоизлучения // Изв. вузов. Радиофизика.—1960.—3, № 6.—С. 921—936.
11. Braude S. Ya., Megn A. V., Rashkovski S. L., et al. Decametric survey of discrete sources in the northern sky. Source catalogue in the range of declinations +10° to +20° // Astrophys. and Space Sci.—1978.—54.—P. 37—128.
12. Braude S. Ya., Megn A. V., Sokolov K. P., et al. Decametric survey of discrete sources in the northern sky. Source catalogue in the range of declinations 0° to +10° // Astrophys. and Space Sci.—1979.—64.—P. 73—126.

13. Braude S. Ya., Miroschnichenko A. P., Sokolov K. P., et al. Decametric survey of discrete sources in the northern sky. Source catalogue in the range of declinations  $-2^{\circ}$  to  $-13^{\circ}$  // *Astrophys. and Space Sci.*—1981.—74.—P. 409—451.
14. Braude S. Ya., Rashkovsky S. L., Sidorchuk K. M., et al. Decametric survey of discrete sources in the northern sky. The catalogue of sources in declinations range  $+30^{\circ}$  to  $+40^{\circ}$  // *Astrophys. and Space Sci.*—2002.—280.—P. 235—299.
15. Braude S. Ya., Sharykin N. K., Sokolov K. P., et al. Decametric survey of discrete sources in the northern sky. Source catalogue in the declinations range  $52^{\circ}$  to  $60^{\circ}$  // *Astrophys. and Space Sci.*—1985.—111.—P. 1—64.
16. Braude S. Ya., Sokolov K. P., Zakharenko S. M. The UTR-2 very low-frequency sky survey of radio sources in the declination range  $41^{\circ}$  to  $52^{\circ}$ . — 1992.—67 p.—(Preprint / Institute of radio astronomy, № 62).

Поступила в редакцию 14.07.08