

ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКОВ С УКРУЧЕНИЕМ РАДИОСПЕКТРОВ В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

На основе выборки объектов со спектральными индексами $\alpha \geq 1$ из каталога внегалактических источников, полученного с помощью радиотелескопа УТР-2, исследуются радиоисточники с укрупнением спектра в декаметровом диапазоне (спектральный тип S^+). В рамках Λ CDM -модели Вселенной определены светимости галактик и квазаров из выборки в декаметровом, сантиметровом и оптическом диапазонах, а также получены оценки напряженности магнитного поля, линейного размера и характерного возраста объектов. Аналогично источникам с линейными крутыми спектрами (спектральный тип S) галактики и квазары со спектрами S^+ имеют высокую радиосветимость и протяженную радиоструктуру. Обнаружена корреляция линейного размера источников спектрального типа S^+ с их низкочастотной светимостью. Для рассмотренных источников выявлена существенная космологическая эволюция светимости.

Ключевые слова: спектральный индекс, радиоспектр, светимость, галактики, квазары

1. Введение

Как известно, радиоизлучение внегалактических источников является нетепловым, их степенные радиоспектры соответствуют синхротронному механизму излучения. В декаметровом диапазоне наблюдается интересная особенность – укрупнение низкочастотной части радиоспектров, установленное по измерениям дискретных источников на радиотелескопе первого поколения УТР-1 [1]. При анализе каталога внегалактических источников, полученного при помощи радиотелескопа УТР-2, оказалось, что $\sim 10\%$ от зарегистрированных внегалактических радиоисточников обнаруживают существенное укрупнение спектра (тип S^+) на низких частотах [2–6] (см. рис. 1).

Предполагается, что крутые радиоспектры обусловлены как механизмами ускорения, так и механизмами энергетических потерь релятивистских электронов в случае непродолжительной инжекции релятивистских частиц [7, 8]. Так как критическая частота синхротронного излучения уменьшается со временем, то она может оказаться за низкочастотной границей наблюдаемого спектра. При синхротронном механизме радиоизлучения в случае непродолжительной инжекции релятивистских частиц [7] спектральный индекс источника может изменяться от $\alpha = (\gamma - 1)/2$ до $\alpha = (2\gamma + 1)/3$, где γ – индекс степенного распределения электронов по энергиям. При этом критическая частота синхротронного

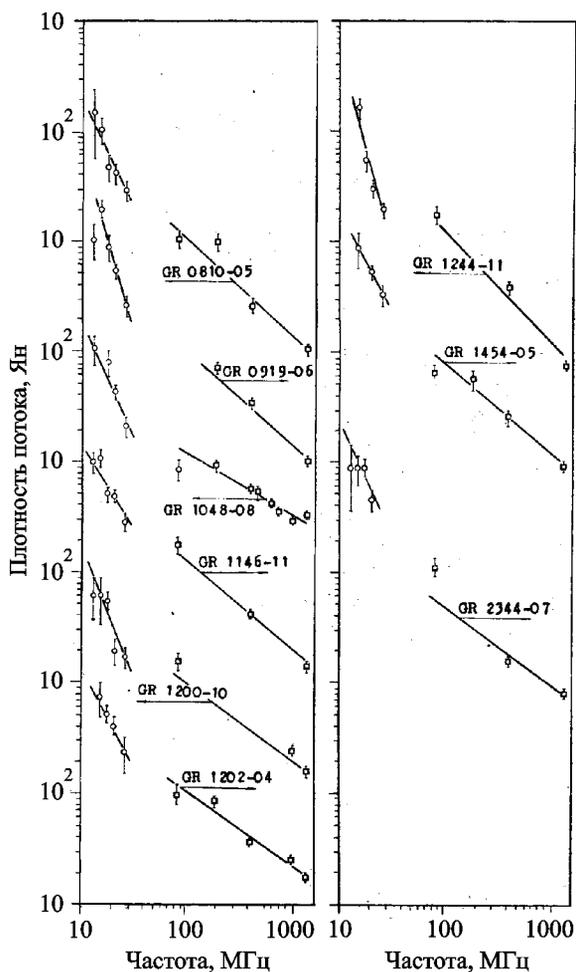


Рис. 1. Примеры спектров типа S^+ для галактик и квазаров, зарегистрированных на радиотелескопе УТР-2

излучения может сместиться к значениям менее 10 МГц. В результате значительное увеличение спектрального индекса радиоисточника может наблюдаться на низких частотах, соответствующих декаметровому диапазону длин волн. При этом большую роль могут играть неоднородности плазмы и магнитного поля, а также многокомпонентная структура радиоисточников.

Кроме того, если радиоисточники имеют крутой спектр на высоких радиочастотах и находятся на больших красных смещениях, они будут наблюдаться с крутыми спектрами на низких частотах, поскольку вследствие красного смещения все особенности спектра перемещаются к более низким частотам. Благодаря этому в декаметровом диапазоне могут обнаруживаться очень далекие галактики и квазары.

В настоящей работе получены оценки основных физических параметров для источников спектрального типа C^+ в рамках модели Вселенной с космологическим членом и темной материей – Λ CDM-модели (Lambda-Cold Dark Matter). Исследуются также соотношения полученных параметров в подвыборках галактик и квазаров.

2. Оценки физических параметров галактик и квазаров с укрупнением спектра

С целью изучения свойств радиоисточников с укрупнением спектра на низких частотах была составлена выборка источников из каталога UTR-2 в интервалах склонений $\delta = -13^\circ \div 20^\circ$ и $\delta = 30^\circ \div 40^\circ$ [2–6]. Критерии отбора объектов для данной выборки следующие: радиоспектр типа C^+ , спектральный индекс в декаметровом диапазоне $\alpha_{dec} \geq 1$, плотность потока $S_{25} > 10$ Ян на частоте 25 МГц. Указанным критериям удовлетворяют 148 источников, в том числе 52 галактики, 36 квазаров и 60 оптически неотжествленных источников. При этом интервал красных смещений объектов из выборки составляет $z = 0.017 \div 2.400$. Оптические и высокочастотные данные для источников из выборки взяты из базы данных NED (<http://nedwww.ipac.caltech.edu>). Заметим, что источники со спектром типа C^+ , как правило, имеют большие угловые размеры, $\sim 10^2$ угловых секунд. Наблюдаемые частоты излома в спектрах источников близки к 80 МГц. В табл. 1 приведены средние значения наблюдае-

Таблица 1. Средние значения наблюдаемых параметров источников из выборки

Параметр	Оптически неотжествленные источники	Галактики	Квазары
$\langle \alpha_{dec} \rangle$	2.55 ± 0.11	2.01 ± 0.08	2.25 ± 0.14
$\langle \alpha_{hf} \rangle$	0.90 ± 0.03	0.74 ± 0.03	0.62 ± 0.05
$\langle S_{25} \rangle$, Ян	22.0 ± 1.2	42.1 ± 1.3	28.5 ± 1.9
$\langle S_{5000} \rangle$, Ян	0.21 ± 0.02	1.54 ± 0.88	1.32 ± 0.52
$\left\langle \lg \left(\frac{S_{25}}{S_{5000}} \right) \right\rangle$	2.05 ± 0.04	1.74 ± 0.05	1.69 ± 0.08
$\langle \theta \rangle$	$93'' \pm 24.5''$	$267.4'' \pm 27.7''$	$197.5'' \pm 14.9''$

Примечание: α_{dec} – спектральный индекс радиоспектра в интервале частот $10 \div 25$ МГц; α_{hf} – высокочастотный спектральный индекс (интервал частот $1400 \div 5000$ МГц); S_{25} – плотность потока радиоизлучения на частоте 25 МГц; S_{5000} – плотность потока радиоизлучения на частоте 5000 МГц; θ – угловой размер радиоисточника.

мых физических параметров радиоисточников с укрупнением спектра для выделенных классов объектов: оптически неотжествленных источников, галактик и квазаров.

В статье исследованы источники с очень большими временами жизни. Для каждого источника из выборки угловой размер определялся по картам NVSS обзора (частота 1400 МГц), представленным в базе данных NED. Как видно из табл. 1, все объекты из выборки являются протяженными объектами, что согласуется с концепцией длительной эволюции радиоисточников с укрупнением спектра. Предполагаем, что угловой размер радиоисточников в NVSS обзоре соответствует угловому размеру источника на низких частотах. Средние величины физических параметров рассмотренных источников (в том числе средние угловые размеры) определялись по обычной методике: сначала указанные параметры были получены для каждого источника, а затем они усреднялись по данной выборке.

Как видно из табл. 1, наибольшее укрупнение спектров в декаметровом диапазоне (т. е. самые большие спектральные индексы α_{dec}) характерно для оптически неотжествленных источников. В то же время эти источники обладают меньшими радиопотоками и меньшими угловыми размерами. Указанные особенности наблюдаемых параметров свидетельствуют об удаленности оптически неотжествленных радиоисточников.

Предполагаем, что соотношение плотностей потоков на низких и высоких частотах $\langle \lg(S_{25}/S_{5000}) \rangle$ может быть оценкой отношения излучения протяженного компонента и излучения центральной области источника. Наблюдаемое низкочастотное укрупнение спектров характеризует протяженную структуру объекта, а более пологий высокочастотный участок спектра обусловлен излучением центральной области, содержащей активное ядро. Из данных табл. 1 следует, что для оптически неотжествленных объектов наблюдается больший вклад протяженного компонента, чем для галактик и квазаров.

Используем для вычислений основных физических характеристик источников из выборки Λ CDM -модель Вселенной с параметрами: относительная плотность материи $\Omega_M = 0.27$, относительная плотность “темной” материи $\Omega_\Lambda = 0.73$, постоянная Хаббла $H_0 = 71$ км/(с · Мпк). Предполагаем также, что в рассмотренных источниках соблюдается равномерное распределение энергии магнитного поля и энергии релятивистских частиц при синхротронном механизме излучения. Для оптически отождествленных объектов определяем расстояния r (по сопутствующему объему) из выражения [9]:

$$r = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz}{\sqrt{\Omega_M(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}},$$

где r – расстояние до источника, см; c – скорость света; z – красное смещение. Монохроматические светимости объектов L_ν определяем с учетом K -поправки, т. е. получаем светимости в системе отсчета объектов:

$$L_{\nu cor} = S_\nu r^2 (1+z)^{1+\alpha},$$

где $L_{\nu cor}$ – светимость в системе отсчета объектов, Вт/(Гц · ср); S_ν – плотность потока излучения объекта на частоте ν , Вт/(см² · Гц); α – спектральный индекс для соответствующего диапазона частот.

Оцениваем линейные размеры R объектов:

$$R = \theta r,$$

где θ – угловой размер источника, рад.

Напряженность магнитного поля в источниках находим из условия равномерного распределения энергии магнитного поля и энергии релятивистских частиц [10]:

$$B = \left[48kA(\gamma, \nu) \frac{S_\nu}{r\theta^3} \right]^{2/7},$$

где B – напряженность магнитного поля, Гс; $k = 100$ – отношение энергий протонов и электронов; $A(\gamma, \nu)$ – табулированная функция.

Оцениваем характерный возраст объектов как время синхротронного высвечивания релятивистских электронов в магнитном поле источника [11]:

$$t_{syn} = 50.3 \cdot \frac{B^{1/2}}{B^2 + B_{CMB}^2} [\nu_b(1+z)]^{-1/2},$$

где t_{syn} – характерный возраст объектов, 10⁶ лет; B – напряженность магнитного поля, 10⁻⁵ Гс; $B_{CMB} = 0.32(1+z)^2$ – напряженность эквивалентного магнитного поля, соответствующего интенсивности микроволнового фона, 10⁻⁵ Гс; ν_b – критическая частота синхротронного спектра источника, ГГц. В настоящей работе расчеты t_{syn} проведены для значения критической частоты $\nu_b = 10$ МГц. Определяем также отношение монохроматических светимостей источников в декаметровом диапазоне ($\nu = 25$ МГц) и на высоких частотах ($\nu = 5000$ МГц и в оптическом диапазоне), $\lg(L_{25 cor}/L_{5000 cor})$, $\lg(L_{25 cor}/L_{opt cor})$, как оценки отношения излучения протяженного компонента и излучения центральной области в источнике [12].

В результате проведенных вычислений в рамках Λ CDM -модели Вселенной для выборки источников со спектром S^+ получены следующие физические характеристики галактик и квазаров: светимости в декаметровом, сантиметровом и оптическом диапазонах, а также их соотношения; напряженность магнитного поля; линейный размер; характерный возраст (см. табл. 2).

Из табл. 2 видно, что и галактики, и квазары, имеющие спектральный тип S^+ , обладают очень высокой радиосветимостью и в декаметровом ($\sim 10^{28}$ Вт/(Гц · ср)), и в сантиметровом ($10^{25} \div 10^{26}$ Вт/(Гц · ср)) диапазонах. При этом радиоисточники имеют линейные размеры порядка 1 Мпс и характерный возраст порядка 10⁸ лет. Оценка напряженности магнитного поля источников со спектром S^+ дает значение около 10⁻⁵ Гс. Сравнивая данные из табл. 2 с определенными ранее параметрами источников с линейным крутым спектром (S-тип) [12], сразу можно выделить отличия. А именно, галактики и кваза-

Таблица 2. Средние значения рассчитанных физических параметров галактик и квазаров из выборки

Параметр	Галактики	Квазары
$\langle L_{25cor} \rangle$, Вт/(Гц·ср)	$(8.14 \pm 5.72) \cdot 10^{27}$	$(4.78 \pm 1.73) \cdot 10^{28}$
$\langle L_{5000cor} \rangle$, Вт/(Гц·ср)	$(4.05 \pm 1.86) \cdot 10^{25}$	$(4.61 \pm 1.72) \cdot 10^{26}$
$\langle L_{opt\ cor} \rangle$, Вт/(Гц·ср)	$(2.02 \pm 1.84) \cdot 10^{22}$	$(1.31 \pm 0.31) \cdot 10^{23}$
$\langle \lg(L_{25cor}/L_{5000cor}) \rangle$	1.83 ± 0.07	2.02 ± 0.10
$\langle \lg(L_{25cor}/L_{opt\ cor}) \rangle$	5.21 ± 0.17	5.42 ± 0.12
$\langle B \rangle$, Гс	$(8.14 \pm 0.58) \cdot 10^{-6}$	$(6.15 \pm 0.30) \cdot 10^{-6}$
$\langle R \rangle$, см	$(3.50 \pm 0.52) \cdot 10^{24}$	$(8.73 \pm 0.75) \cdot 10^{24}$
$\langle t_{syn} \rangle$, годы	$(4.68 \pm 0.42) \cdot 10^8$	$(2.04 \pm 0.25) \cdot 10^8$

ры с C^+ -спектром обладают спектральными индексами почти вдвое большими, чем источники со спектром S-типа, и значения напряженности магнитного поля на порядок меньше, а возраст на порядок больше, чем объекты со спектром S-типа.

Как следует из анализа карт NVSS обзора, на укрупнение спектров источников из выборки в декаметровом диапазоне эффект спутывания практически не влияет. Важно, что анализировались также карты NVSS в окрестности источников с крутым линейным (S) спектром, исследованных в работе [12].

Если бы спутывание было главной причиной укрупнения спектров, тогда не наблюдались бы источники с линейным крутым (S) спектром, а регистрировались бы только источники с укрупнением спектра в декаметровом диапазоне. Заметим, что в каталоге внегалактических источников, полученном на УТР-2, зарегистрировано источников с крутым линейным (S) спектром почти вдвое больше, чем источников со спектром C^+ .

Рассмотрим различные зависимости полученных физических параметров с целью установления возможных проявлений эволюции источников со спектром C^+ .

Зависимость спектрального индекса в декаметровом диапазоне от красного смещения для галактик и квазаров типа C^+ (см. рис. 2, а), возможно, имеет две ветви положительной корреляции, соответствующие медленной и быстрой эволюции объектов. В работах [13–15] отмечена слабая корреляция спектральных индексов и красных смещений радиоисточников. Как видно из

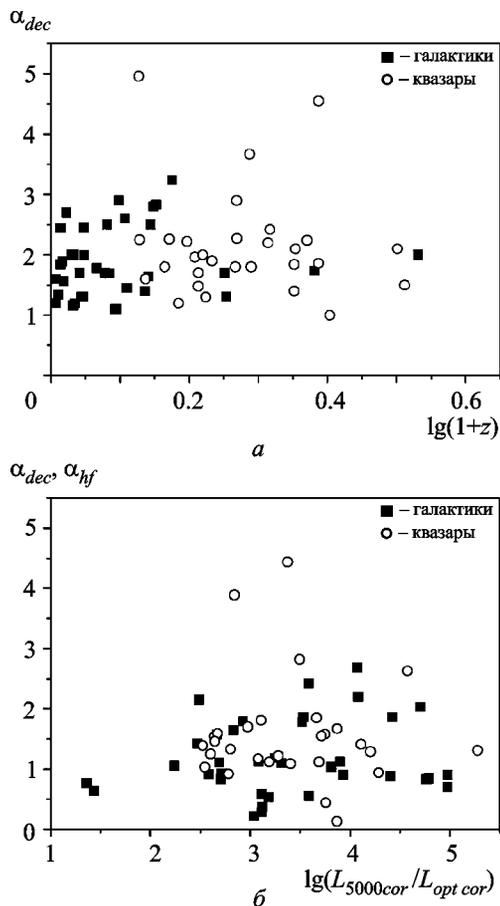


Рис. 2. Зависимость спектрального индекса источников со спектром типа C^+ в декаметровом диапазоне от красного смещения (а) и от светимости центральной области (б)

рис. 2, б, изменение спектральных индексов слабо зависит от высокочастотной светимости, соответствующей центральной области источника. На корреляцию спектральных индексов и светимостей источников указано в работах [16, 17].

Зависимости, приведенные на рис. 3, позволяют сделать вывод, что напряженность магнитного поля источников со спектрами C^+ практически не зависит от красного смещения.

В разные периоды своей активности источник имеет разную светимость. На заметную эволюцию светимости указывает зависимость, приведенная на рис. 4. В частности, для объектов с малыми красными смещениями (“старые” объекты) наблюдаются меньшие светимости. Поскольку отношение светимостей не зависит от выбранной модели Вселенной, полученная зависимость (см. рис. 4) реально отражает эволюцию светимости галактик и квазаров со спектром типа C^+ . Дисперсия в этой зависимости, воз-

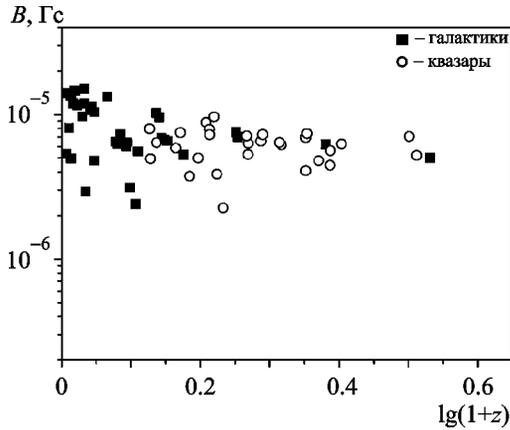


Рис. 3. Зависимость напряженности магнитного поля источников со спектром типа C^+ от красного смещения

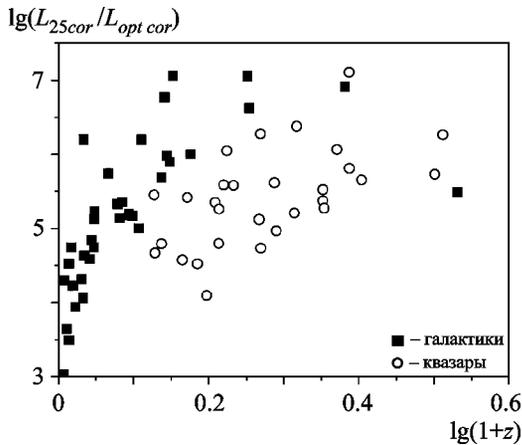


Рис. 4. Зависимость отношения монохроматических светимостей источников со спектром C^+ от красного смещения

можно, обусловлена рекуррентностью (циклическостью) активности ядер галактик и квазаров. Интересно, что на рис. 4 можно отметить максимум в зависимости светимости от красного смещения, что также может быть связано с циклическостью активности источников.

Положительная корреляция светимости и линейного размера (рис. 5) указывает на большую протяженность радиоструктур для более мощных радиоисточников со спектром C^+ .

Зависимость, представленная на рис. 6, обнаруживает большую дисперсию характерного возраста источников со спектром типа C^+ для самых больших линейных размеров их радиоструктуры. Рис. 6 отображает (косвенно) тот факт, что активные ядра источников имеют различную по величине энергию. Очевидно, что более мощные “центральные машины” источников могут

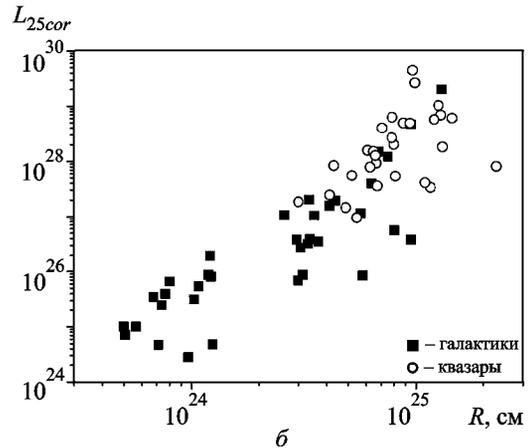
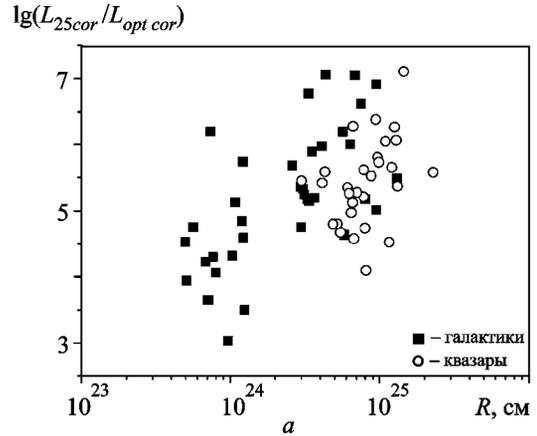


Рис. 5. Зависимости отношения монохроматических светимостей (а) и низкочастотной светимости (б) источников со спектром C^+ от линейного размера этих источников

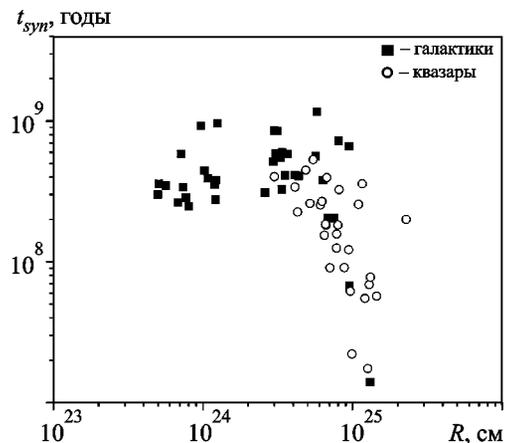


Рис. 6. Зависимость характерного возраста источников со спектром типа C^+ от их линейного размера

обеспечить более мощные джеты, образующие более протяженные радиоструктуры за меньшее характерное время, чем менее мощные объекты.

3. Заключение

Итак, в рамках Λ CDM-модели Вселенной для выборки радиисточников с крутым спектром типа S^+ из каталога УТР-2 получены следующие результаты.

Аналогично объектам с линейными крутыми спектрами галактики и квазары со спектром S^+ имеют высокую радиосветимость (порядка 10^{28} Вт/(Гц·ср) на частоте 25 МГц) и очень протяженную радиоструктуру с линейным размером порядка 1 Мпк.

Линейный размер источников со спектром S^+ положительно коррелирует с их низкочастотной светимостью.

Отношение монохроматических светимостей источников со спектром S^+ обнаруживает существенную космологическую эволюцию светимости.

Зависимость спектрального индекса источников с крутыми спектрами в декаметровом диапазоне от красного смещения может указывать на две ветви эволюции объектов.

Оптически неотожествленные радиисточники со спектром S^+ (которые могут быть очень удаленными объектами) имеют больший вклад протяженного компонента в радиоизлучение и более крутые спектры, чем галактики и квазары спектрального типа S^+ .

Автор выражает благодарность рецензенту за сделанные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брауде С. Я., Жук И. Н., Лебедева О. М., Мень А. В., Рябов Б. П. Низкочастотные спектры дискретных источников космического излучения // УФЖ. – 1970. – Т. 15, № 1. – С. 1–13.
2. Braude S. Ya., Megn A. V., Rashkovski S. L., Ryabov B. P., Sharykin N. K., Sokolov K. P., Tkachenko A. P., and Zhouk I. N. Decametric survey of discrete sources in the northern sky. II // Astrophys. Space Sci. – 1978. – Vol. 54, No. 1. – P. 37–128.
3. Braude S. Ya., Megn A. V., Sokolov K. P., Tkachenko A. P., and Sharykin N. K. Decametric survey of discrete sources in the northern sky. V // Astrophys. Space Sci. – 1979. – Vol. 64, No. 1. – P. 73–126.
4. Braude S. Ya., Miroshnichenko A. P., Sokolov K. P., and Sharykin N. K. Decametric survey of discrete sources in the northern sky. VII // Astrophys. Space Sci. – 1981. – Vol. 74, No. 2. – P. 409–451.
5. Braude S. Ya., Miroshnichenko A. P., Sokolov K. P., and Sharykin N. K. Decametric survey of discrete sources in the northern sky. VIII // Astrophys. Space Sci. – 1981. – Vol. 76, No. 2. – P. 279–299.
6. Брауде С. Я., Мирошниченко А. П., Раишковский С. Л., Сидорчук К. М., Сидорчук М. А., Шарыкин Н. К. Обзор дис-

- кретных источников Северного неба. XIII // Кинематика и физика небесных тел. – 2003. – Т. 19, № 4. – С. 291–306.
7. Кардашев Н. С. Нестационарность спектров молодых источников нетеплового излучения // Астрономический журнал. – 1962. – Т. 39, вып.3. – С. 393–409.
 8. Гестрин С. Г., Конторович В. М., Кочанов А. Е. Диффузионная модель протяженных радиокомпонентов и струй с движущимся источником ускоренных частиц // Кинематика и физика небесных тел. – 1987. – Т. 3, № 4. – С. 57–66.
 9. Hogg D. Distance measures in cosmology // Astro-ph/9905116. – 1999. – 16 p.
 10. Гинзбург В. Л. Теоретическая физика и астрофизика. – М.: Наука, 1987. – 488 с.
 11. Jamrozy M., Machalsky J., Mack K.-H., and Klein U. Ageing analysis of the giant radio galaxy J1343+3758 // Astron. Astrophys. – 2005. – Vol. 433, No. 2. – P. 467–478.
 12. Miroshnichenko A. P. Luminosity and space distributions of radio sources with steep spectra at the decameter band / In Astrophysics and Cosmology after Gamow / Eds. S. Chakrabarti, A. Zhuk, and G. Bisnovatyi-Kogan. – New York : AIPC, 2010. – Vol. 1206. – P. 335–345.
 13. Blumental G. and Miley G. Spectral index dependent properties of steep spectrum radio sources // Astron. Astrophys. – 1979. – Vol. 80, No. 1. – P. 13–21.
 14. Laine R. and Peacock J. The relation between radio luminosity and spectrum for extended extragalactic radio sources // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 1980. – Vol. 190. – P. 903–924.
 15. Dagkesamanskii R. D. Spectral index-redshift relation for radio galaxies and quasars / In Extragalactic Radio Sources / Eds. R. Ekers, C. Fanti, and L. Padrielli. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. – P. 569–570.
 16. Heeschen D. A color-absolute magnitude diagram for extragalactic radio sources // Publ. Astron. Soc. Pac. – 1960. – Vol. 72. – P. 368–376.
 17. Allington-Smith J. A complete sample of extragalactic radio sources at 1 Jy at 408 MHz // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 1984. – Vol. 209. – P. 665–681.

А. П. Мирошниченко

Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

ФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ ДЖЕРЕЛ З УКРУЧЕННЯМ РАДІОСПЕКТРІВ У ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ

На основі вибірки об'єктів із спектральними індексами $\alpha \geq 1$ з каталогу позагалактичних джерел, створеного за допомогою радіотелескопа УТР-2, досліджуються радіоджерела, що мають укрупнення спектра в декаметровому діапазоні (спектральний тип S^+). В межах Λ CDM-моделі Всесвіту визначено світності галактик і квазарів з вибірки в декаметровому, сантиметровому та оптичному діапазонах, а також отримано оцінки напруженості магнітного поля, лінійного розміру і характерного віку об'єктів. Аналогічно до джерел з лінійними крутими спектрами (спектральний тип S) галактики і квазари із спектрами S^+ мають високу радіосвітність та протяжну радіоструктуру. Знайдено кореляцію лінійного розміру джерел спектрального типу S^+ з їх низкочастотною світністю. Для розглянутих джерел виявлено суттєву космологічну еволюцію світності.

A. P. Miroschnichenko

Institute of Radio Astronomy, National Academy
of Sciences of Ukraine,
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

PHYSICAL PARAMETERS OF SOURCES
WITH STEEPNESS OF RADIO SPECTRA
AT THE DECAMETER BAND

Based on the sample of objects with spectral indices $\alpha \geq 1$ from the extragalactic source's catalog compiled with the UTR-2 radio telescope the decameter band radio sources with spectrum steepness (the spectral type C^+) are studied. The luminosities of the

sampled galaxies and quasars at the decameter, centimeter and optical bands and the estimated values of the magnetic field strength, linear size and characteristic age are determined within the Λ CDM -model of the Universe. On the analogy of sources with the linear steep spectrum (the spectral type S), galaxies and quasars with C^+ -spectra have the high radio luminosity and extent radio structure. The correlation of the linear size of C^+ -spectrum sources and their low-frequency luminosity is found. The considerable cosmological evolution of luminosity is revealed for the examined sources.

Статья поступила в редакцию 10.10.2011