

Исследование статистических свойств низкочастотных спектров протяженных внегалактических радиоисточников различных классов

К.П. Соколов

*Радиоастрономический институт Национальной Академии Наук Украины
Украина, 310002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4*

Статья поступила в редакцию 1 декабря 1995 г.

Рассмотрены статистические свойства низкочастотных (в диапазоне 16,7-178 МГц) спектров внегалактических радиоисточников, отождествляемых с радиогалактиками и квазарами, а также неотожествленных объектов в статистически полных выборках источников из радиообзоров 4С и УТР-2. Получены оценки относительного содержания радиоисточников с различными типами низкочастотных спектров. Показано, что протяженные компоненты радиогалактик и квазаров характеризуются статистически различимыми средними значениями низкочастотных спектральных индексов.

Розглянуто статистичні властивості низькочастотних спектрів (в діапазоні 16,7-178 МГц) позагалактичних радіоджерел, ототожнених з радіогалактиками і квазарами, а також неототожнених об'єктів в статистично повних виборках джерел з радіообзорів 4С і УТР-2. Одержано оцінки відносно змісту радіоджерел з різними типами низькочастотних спектрів. Показано, що протяжні компоненти радіогалактик і квазарів характеризуються статистично різними середніми значеннями низькочастотних спектральних індексів.

1. Введение

Настоящая работа посвящена определению наиболее общих статистических свойств низкочастотных (в диапазоне 16,7-178 МГц) спектров внегалактических объектов на основании анализа статистически полных выборок радиоисточников из обзора 4С на частоте 178 МГц [1] и обзора небесной сферы, выполненного с помощью радиотелескопа УТР-2 [2-7] на ряде самых низких из применяемых в современной радиоастрономии частот в диапазоне 10-25 МГц.

Как известно, интегральные спектры внегалактических радиоисточников, полученные в широком диапазоне частот [8-20], свидетельствуют о присутствии в их структуре помимо ярких компактных компонент ($T_b \sim 10^{11-12} \text{K}$, $l < 1$ кпк) с плоскими спектрами ($\alpha < 0,5$, $S \sim \nu^{-\alpha}$) также и протяженных (~ 100 кпк) компонент с низкой поверхностной яркостью и крутыми спектрами ($\nu > 0,8$), излучение которых доминирует на низких частотах (< 200 МГц). В литературе (например, [21-24]) показано, что анализ низкочастотных спектров позволяет получить важную информацию о физических условиях внутри протяженных компонент внегалактических радиоисточников, их структуре и пара-

метрах окружающей межгалактической среды. При этом поскольку структура и угловые размеры протяженных компонент радиоисточников проявляют существенную зависимость от свойств окружающей межгалактической среды и расстояния, можно ожидать, что различия статистических свойств выборок низкочастотных спектров для внегалактических радиоисточников различных классов (радиогалактик, квазаров и неотожествленных объектов) должны отражать изменения физических условий внутри их протяженных компонент [25-27]. Экспериментальная проверка этого предположения на основании данных, полученных с помощью радиотелескопа УТР-2 на частотах 10; 12,6; 14,7; 16,7; 20 и 25 МГц, составляет основную цель настоящей работы.

С другой стороны, в литературе [8-20] установлено существование трех основных типов низкочастотных спектров, а именно:

1) спектры, подчиняющиеся единому степенному закону $S \sim \nu^{-\alpha}$ во всем измеренном интервале частот, вплоть до самых низких (10-25 МГц). Это так называемые линейные (в масштабе $\log S - \log \nu$) спектры, или спектры типа S ;

2) спектры с более крутым, чем на высоких частотах, низкочастотным участком, т. е.

$\alpha_{\text{нч}} > \alpha_{\text{нч}}$. Это так называемые спектры с положительной кривизной или спектры типа С+. Как правило, такой вид интегрального спектра свидетельствует о присутствии в структуре радиоисточника диффузной протяженной компоненты с низкой поверхностной яркостью и очень крутым спектром ($\alpha_{\text{нч}} > 1,0$);

3) заваливающиеся на низких частотах спектры или спектры типа С-, для которых $\alpha_{\text{нч}} < \alpha_{\text{нч}}$.

Как правило, наблюдаемые интегральные спектры радиоисточников со сложной угловой структурой являются результатом суперпозиции спектров их ярких компактных и протяженных компонент. Подробно физические причины, приводящие к отличию спектров однородных синхротронных радиоисточников от единого степенного закона, и возможные механизмы низкочастотных завалов в них рассмотрены в работах [21-24]. При этом следует отметить, что в литературе приводятся весьма противоречивые оценки относительного содержания радиоисточников с различными типами низкочастотных спектров в статистически полных выборках. В связи с этим в данной работе предпринята также попытка получить эти оценки на основании анализа низкочастотных спектров статистически полной выборки радиоисточников из обзора 4С.

2. Критерии анализа выборок низкочастотных спектров

Начало исследованиям статистических свойств низкочастотных спектров внегалактических радиоисточников положили работы [28-30], которые были основаны на выборках наиболее мощных радиоисточников из обзора 3CR [31, 32]. Спектры более слабых радиоисточников из обзора 4С в диапазоне частот 38-2650 МГц рассмотрены в работах [33-35]. Наиболее низкочастотные данные о плотностях потоков радиоисточников использованы в работах [8,36], в которых исследованы статистики спектров в диапазоне частот 10-10700 МГц. При этом в работе [36] для определения низкочастотного участка спектров использовались данные радиообзора небесной сферы на радиотелескопе УТР-2. Однако имеющиеся в настоящее время в литературе оценки средних значений низкочастотных спектральных индексов для протяженных компонент радиоисточников, отождествляемых с радиогалактиками, квазарами, и неотожествленных объектов, и оценки относительного содержания источников с различными типами низкочастотных спектров (т. е. спектрами типа S, С-, С+)

существенно различаются и не могут быть объяснены только отличиями значений пороговых плотностей потоков рассмотренных выборок радиоисточников. Приведенные в работах [29,35] признаки классификации типов спектров позволяют предположить, что основной причиной различий полученных оценок является отсутствие единых количественных критериев анализа низкочастотных спектров. Так, в работе [29] тип спектра для каждого радиоисточника определялся сравнением двухчастотных спектральных индексов α_{750}^{38} и α_{5000}^{750} соответственно в диапазонах частот 38-750 МГц и 750-5000 МГц. В работе [35] интегральный спектр источника оценивался как нелинейный, если хотя бы одна из экспериментальных точек не соответствовала линейной аппроксимации спектров в диапазоне 38-2650 МГц. В более поздних работах [8,36] применялась нелинейная аппроксимация экспериментальных данных в диапазоне 10-10700 МГц, учитывающая возможные отличия наблюдаемых спектров от единого степенного закона. Недостатком статистики спектров, полученных таким методом, является сложность учета в последующем анализе значений экспериментальных ошибок в оценках спектральных индексов, поскольку для разных радиоисточников они рассчитаны, как правило, на основании разного количества экспериментальных точек. Кроме того, следует специально отметить, что в этих работах рассматривается очень широкий частотный диапазон, внутри которого, наблюдаемые интегральные спектры формируются излучением принципиально различных компонент в сложной структуре радиоисточников, а следовательно, действуют различные механизмы, приводящие к отличиям наблюдаемых интегральных спектров от единого степенного закона. В связи с этим при последующем статистическом анализе выборок таких спектров, несмотря на использование в них наиболее низкочастотных данных, трудно определить статистические свойства, присущие излучению именно протяженных компонент с низкой поверхностной яркостью в структуре радиоисточников.

Следует также специально отметить еще один эффект, который необходимо учитывать при статистическом анализе низкочастотных спектров. Это эффект наблюдательной селекции. Как известно, при понижении частоты радиообзоров значения пороговых плотностей потоков S_{min} источников, формирующих статистически полные выборки, как правило, возрастают. Поэтому, в выборках радиоисточников, составленных по данным низкочастотных радиообзоров, источники с плоскими и завали-

вающимися на низких частотах спектрами всегда подвержены наблюдательной селекции. Это обстоятельство отмечалось также в [37]. Ввиду этого приведенные во многих работах (например, [8,20]) оценки средних значений низкочастотных спектральных индексов и относительного содержания источников с различными типами спектров заведомо подвержены действию эффекта наблюдательной селекции, так как основаны на анализе выборок радиоисточников, измеренных на самых низких частотах рассматриваемых диапазонов. Отсюда следует, что исследования статистики спектров с использованием данных на частотах ниже 100 МГц можно проводить только на основании статистически полной выборки радиоисточников, измеренных на более высоких частотах, например, на частоте 178 МГц. С другой стороны, в силу указанных выше физических причин, диапазон частот, в котором производится анализ свойств низкочастотных спектров, обусловленных излучением именно протяженных компонент в структуре радиоисточников, не должен включать частот выше ~ 400 МГц, где уже может быть заметным вклад от излучения ярких компактных компонент в их структуре.

В настоящей работе для характеристики типа спектра радиоисточников рассматривается диапазон частот 16,7-1400 МГц. При этом спектры источников в этом диапазоне будем характеризовать двумя значениями двухточечных спектральных индексов - низкочастотным $\alpha_{178}^{16,7}$ в интервале частот 16,7-178 МГц и высокочастотным α_{1400}^{178} в интервале частот 178-1400 МГц, имеющими приблизительно равные коэффициенты перекрытия по частоте. Используемые в данной работе значения плотностей потоков на частотах 178 МГц и 1400 МГц взяты из соответствующих обзоров [31,38-43], которые выполнены с помощью инструментов, имеющих угловое разрешение, сравнимое с разрешением радиотелескопа УТР-2, а также из работы [37]. Плотности потоков радиоисточников на самых низких частотах будем характеризовать значениями $\bar{S}_{16,7}$ на центральной частоте 16,7 МГц диапазона УТР-2, рассчитанными на основании линейной интерполяции всех имеющихся экспериментальных данных, полученных с помощью радиотелескопа УТР-2 в интервале частот (2,6-25,0 МГц). Можно показать, что при таком подходе стандартная ошибка определения зна-

чений $\bar{S}_{16,7}$ в среднем не превосходит ошибок в оценках плотностей потоков, измеренных на более высоких частотах 178 и 1400 МГц. Следовательно, результирующая неопределенность в оценках значений низкочастотных спектральных индексов $\alpha_{178}^{16,7}$, характеризующих излучение от протяженных компонент в структуре радиоисточников, не определяется полностью ошибкой в оценках плотностей потоков, измеренных на самых низких частотах.

Как показано в работе [44], на участках небесной сферы со значениями склонения $-7^\circ \leq \delta < 60^\circ$, общих для обзоров УТР-2 и 4С, в качестве единого порогового потока статистически полной выборки радиоисточников из обзора УТР-2 можно принять значение $\bar{S}_{16,7} = 50$ Ян. В связи с этим для исследования статистики низкочастотных спектров будем использовать выборку радиоисточников из обзора 4С со значениями плотностей потоков $S_{178} \geq 6$ Ян, которым соответствует пороговый поток $\bar{S}_{16,7 \text{ мин}}$ выборки УТР-2 при значениях $\alpha_{178}^{16,7} \approx 0,9$.

3. Сравнительный анализ распределений спектральных индексов для объектов различных классов

Рассмотрим распределения низкочастотных спектральных индексов для радиоисточников, отождествляемых с радиогалактиками и квазарами, и неотждествляемых объектов. В табл. 1 приведен состав оптических отождествлений для статистически полных выборок внегалактических радиоисточников из обзоров УТР-2 и 4С на участке небесной сферы между склонениями $-4^\circ \leq \delta \leq +4^\circ$. Основной причиной выбора именно этого участка небесной сферы, обоснованного в работе [44], является статистическая полнота оптических отождествлений наблюдаемых радиоисточников относительно видимой оптической величины $m_2 = 20,0 \pm 0,5$ [45-47]. Представленные в табл. 1 количественные оценки числа радиоисточников на общем участке небесной сферы в выборках УТР-2 ($N_{\text{УТР}} = 116$) и 4С ($N_{4С} = 68$), характеризующихся приблизительно равными значениями пороговых плотностей потоков (приведенными к одной частоте при $\alpha = 0,9$), еще раз подтверждают вывод работ [48-50] об увеличении значений

Таблица 1

Абсолютное (n) относительное содержание (n/N) радиогалактик, квазаров и неотождествленных радиоисточников в статистически полных выборках УТР-2 и 4С

Выборка	УТР-2		4С		Кол-во общих источников
	n	n/N	n	n/N	
Радиогалактики (G)	34	0,29±0,04	29	0,43±0,06	24
Неотождествленные источники (UN)	62	0,54±0,05	26	0,38±0,06	16
Квазары (QSO)	20	0,17±0,03	13	0,19±0,05	8
Суммарное количество радиоисточников в выборке. (N)	116	—	68	—	48

поверхностной плотности распределения радиоисточников, наблюдаемых на все более низких частотах. Так, выборки УТР-2 и 4С содержат только 48 общих радиоисточников (т. е. менее 50% от общего числа источников в выборке УТР-2). Отсюда следует, что увеличение числа радиоисточников в выборке УТР-2 возможно только за счет источников с очень крутыми спектрами ($\alpha_{178}^{16,7} \geq 1,0$), плотности потоков которых на частоте 178 МГц ниже порога обнаружения радиообзора 4С. Аналогичный вывод следует также и из данных работы [8]. Напротив, 20 источников из выборки 4С отсутствуют в выборке УТР-2. Выполненный ранее [44] анализ параметров обнаружения радиоисточников в обзоре УТР-2 выявил следующие основные причины отсутствия источников 4С в радиообзоре УТР-2:

1) плоские или заваливающиеся на низких частотах спектры источников 4С, что приводит к значениям их плотностей потоков в диапазоне частот 10-25 МГц ниже порога обнаружения обзора УТР-2 (как правило, это источники с $S_{178} > 4$ Ян);

2) неразрешаемые на УТР-2 источники, угловое расстояние между которыми меньше размера диаграммы направленности УТР-2 ($\theta \approx 0,5^\circ$ на 25 МГц);

3) подавление одного радиоисточника другим рядом расположенным источником (угловое расстояние $\leq 2^\circ$), превосходящим его по плотности потока в 10 и более раз.

Как показал анализ, в данном случае причиной отсутствия 20 радиоисточников 4С со значениями $S_{178} > 6$ Ян в рассматриваемой выборке УТР-2 является уже упоминавшийся эффект наблюдательной селекции, так как эти источники имеют плоские или заваливающиеся на низких частотах спектры (т. е. они и не должны наблюдаться в выборке УТР-2).

Проведем качественное сравнение распределений низкочастотных спектральных индексов в выборках УТР-2 и 4С. На рис. 1а представлена гистограмма распределения $m(\alpha_{178}^{16,7})_{4С}$ спектральных индексов $\alpha_{178}^{16,7}$ для всех источников выборки 4С.

Распределение $m(\alpha_{178}^{16,7})_{4С}$ характеризуется медианным значением $(\alpha_{178}^{16,7})_{med} = 0,84 \pm 0,02$, $\sigma = 0,15$ (значение σ определено как половина интервала значений $\alpha_{178}^{16,7}$, содержащего 2/3 источников; ошибка $\Delta \alpha_{med} = \sigma / N^{1/2}$ [51]). Максимальное значение $\alpha_{178}^{16,7}$ в рассматриваемой выборке 4С составляет 1,2.

На рис. 1б представлено распределение $m(\alpha_{178}^{16,7})_{УТР-2}$ для выборки УТР-2. Асимметричность распределения $m(\alpha_{178}^{16,7})_{УТР-2}$ при значениях $\alpha_{178}^{16,7} < 0,8$ обусловлена эффектом наблюдательной селекции, но продолжение распределения в сторону значений $\alpha_{178}^{16,7} > 1,0$ свидетельствует о наличии в выборке УТР-2 радиоисточников с более крутыми, чем в выборке 4С, низкочастотными спектрами. В связи с этим возникает вопрос, какой класс радиоисточников характеризуется самыми крутыми низкочастотными спектрами. Для ответа сравним (качественно) распределения низкочастотных спектральных индексов для радиоисточников из обзоров УТР-2 и 4С, отождествляемых с радиогалактиками и квазарами, и неотождествленных объектов.

На рис. 2 представлены распределения $m(\alpha_{178}^{16,7})$ для радиогалактик (G), квазаров

(QSO) и неотожествленных объектов (UN) из выборки УТР-2.

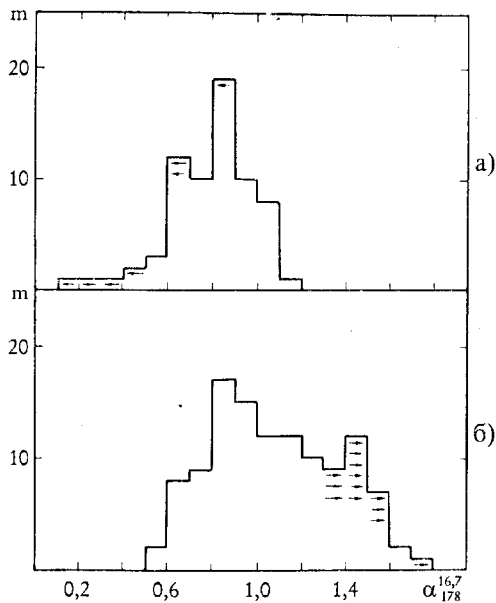


Рис. 1. Распределения низкочастотных спектральных индексов для выборок радиисточников из обзоров 4C (а) и УТР-2(б)

Из вида распределений следует, что увеличение на самых низких частотах числа радиисточников с крутыми спектрами обусловлено в основном неотожествленными радиисточниками и квазарами, относительно содержание которых в выборке УТР-2 возрастает при увеличении значений $\alpha_{178}^{16.7}$. При этом отметим, что радиисточники с очень крутыми спектрами представлены только этими классами объектов.

В литературе неоднократно предполагалось, что радиисточники, имеющие очень крутые низкочастотные спектры, в среднем более удалены, чем источники с нормальными ($\alpha \approx 0,7-0,8$) спектрами [52-54]. Так, для радиогалактик отмечается корреляция (подтверждающая это предположение) между средними значениями спектральных индексов $\langle \alpha \rangle$ и их видимой оптической величиной m_v , которую, как было показано в работах [8,55-57] можно рассматривать как меру расстояния. Напротив, для значений $\langle \alpha \rangle$, полученных по данным измерений на частотах выше 1000 МГц, наблюдается обратная зависимость, при которой самые удаленные объекты - квазары имеют статистически более плоские спектры, чем ра-

диогалактики, что с вероятностью $\sim 0,8$ позволяет воспроизвести оптические отождествления наблюдаемых радиисточников только на основании значений их высокочастотных спектральных индексов, используя в качестве критерия значение $\alpha = 0,5$ [56,58,59]. Это объясняется тем, что высокочастотные спектры радиисточников определяются излучением ярких компактных компонент в их структуре, которые, как известно, наиболее выражены в квазарах. Как правило, в этих компонентах наблюдается эффект синхротронного самопоглощения, что приводит к их более плоским, чем у радиогалактик, спектрам. Напротив, низкочастотное излучение радиисточников определяется их протяженными компонентами, структура и физические условия которых, а следовательно, и низкочастотный спектр зависят от параметров окружающей источник межгалактической среды [25-27,60-64]. Это находит свое подтверждение также, в частности, в экспериментально установленной тенденции увеличения среднего спектрального индекса квазаров при понижении частоты наблюдений [36]. Так, средние значения спектральных индексов радиогалактик и квазаров, полученные с использованием данных на частотах метрового диапазона приблизительно равны и составля-

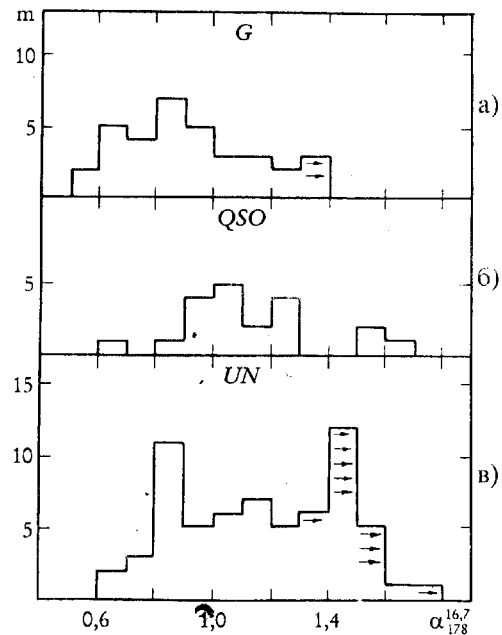


Рис. 2. Распределения низкочастотных спектральных индексов для радиогалактик (а), квазаров (б) и неотожествленных объектов (в) из обзора УТР-2.

ют $\approx 0,8$. С одной стороны, это свидетельствует о том, что квазары и радиогалактики имеют протяженные компоненты с низкой поверхностной яркостью и крутыми спектрами, вклад которых в интегральное излучение начинает проявляться все более отчетливо при понижении частоты. С другой стороны, можно ожидать, что в рассматриваемом нами диапазоне частот 16,7-178 МГц может наблюдаться дальнейшее увеличение значений $\langle \alpha \rangle$ для квазаров, поскольку давление окружающей их межгалактической среды зависит от расстояния [65]:

$$P_{IGM}(z) = P_{IGM}(z=0)(1+z)^5, \quad (1)$$

что может приводить к увеличению среднего времени жизни протяженных компонент все более удаленных радиоисточников (квазаров) по сравнению с относительно близкими объектами (радиогалактиками), а следовательно, и к большей крутизне их низкочастотных спектров. В связи с этим отметим, что, согласно табл. 1, выборки УТР-2 и 4С характеризуются приблизительно равным относительным содержанием квазаров, но выборка УТР-2 содержит в основном другие квазары ($n_{\text{доп}}=12$), характеризующиеся спектрами типа С+ (8 источников) и S (4 источника) со значениями $\alpha_{178}^{16,7} > 1,0$, что качественно согласуется с упомянутым выше предположением.

В силу причин, изложенных выше, количественные оценки средних значений низкочастотных спектральных индексов $\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle$ для внегалактических радиоисточников различных классов получим на основании анализа статистически полной выборки 4С источников, наблюдаемых на частоте 178 МГц. При этом, так как в данной работе предметом исследования являются распределения $\alpha_{178}^{16,7}$, характеризующие излучение от протяженных, оптически тонких на низких частотах компонент радиоисточников, из рассматриваемой выборки необходимо исключить источники со спектрами типа С-, которые обусловлены эффектами синхротронного самопоглощения в компактных ярких деталях их структуры и свободно-свободного поглощения в межгалактической среде, т. е. не отражающих физические условия внутри протяженных компонент радиоисточников.

На рис. 3 представлены распределения $m(\alpha_{178}^{16,7})$ для радиогалактик (G), квазаров (QSO) и неотожествленных радиоисточников (UN) из обзора 4С.

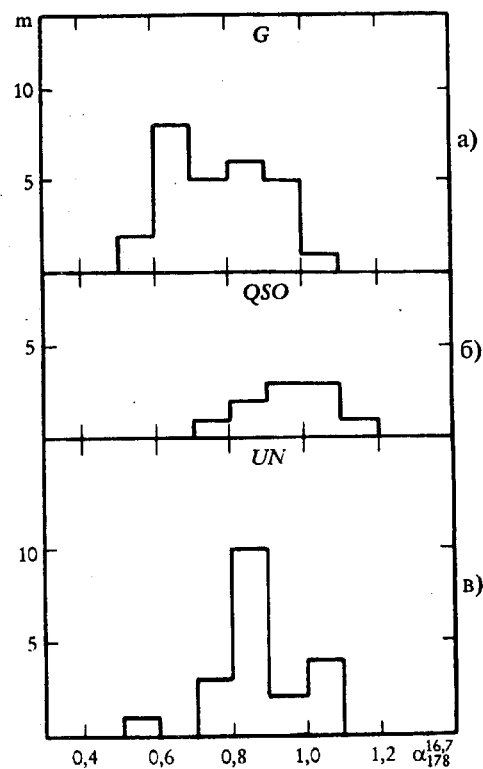


Рис. 3. Распределения низкочастотных спектральных индексов для радиогалактик (а), квазаров (б) и неотожествленных радиоисточников (в) из обзора 4С

Средневзвешенные значения спектральных индексов для каждого класса объектов составляют:

$$\begin{aligned} \langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle_{\text{QSO}} &= 0,94 \pm 0,03; \quad \sigma = 0,09; \\ \langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle_{\text{UN}} &= 0,82 \pm 0,02; \quad \sigma = 0,09; \\ \langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle_{\text{G}} &= 0,74 \pm 0,02; \quad \sigma = 0,1; \end{aligned} \quad (2)$$

Отсюда следует, что в диапазоне частот 16,7-178 МГц протяженные компоненты квазаров и радиогалактик характеризуются статистически различными средними значениями низкочастотных спектральных индексов.

Отметим, что значение $\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle_{\text{QSO}}$ получено на основании малой статистически полной выборки квазаров ($n = 10$). Однако количество общих радиоисточников, отождествляемых с квазарами и галактиками в выборках УТР-2 и 4С (см. табл. 1), и распределение $m(\alpha_{178}^{16,7})_{\text{УТР-2}}$ для квазаров (см. рис. 2б) качественно подтверждают более высокие значения $\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle$ для квазаров. Полученная нами оценка значения $\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle_{\text{QSO}}$ согласуется также с наблюдае-

мым на более высоких частотах эффектом увеличения значений $\langle \alpha \rangle_{QSO}$ при понижении частоты. Этот эффект может быть обусловлен только увеличением в измеряемых на все более низких частотах значениях плотности потока вклада от протяженных компонент квазаров [66-68], характеризующихся крутыми спектрами. В нашем случае наиболее явно этот эффект проявляется в формировании у многих квазаров, например GR1226+02 (3C273), GR1053+02 (4C02.31), GR1112-03 (4C-03.41), GR1228-02 (4C-02.55), интегральных спектров типа С+. С другой стороны, согласно работе [69], протяженные компоненты 3С квазаров характеризуются значением $\langle \alpha \rangle \approx 1,0$, что согласуется с полученной выше оценкой $\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle_{QSO}$ и оценкой $(\alpha_{QSO})_{med} = 0,98$ из работы [8], где также выполняется соотношение $(\alpha_{QSO})_{med} > (\alpha_G)_{med}$. Хорошее согласие независимых оценок средних значений низкочастотных спектральных индексов для квазаров и радиогалактик свидетельствует об их статистической значимости.

Из полученных оценок $\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle$ следует, что в диапазоне 16,7-178 МГц для протяженных оптически тонких компонент квазаров, радиогалактик и неотождествленных объектов выполняется следующее количественное соотношение:

$$\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle_{QSO} > \langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle_{UN} > \langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle_G \quad (3)$$

Это соотношение согласуется с предположением о существовании корреляционной зависимости между значениями низкочастотных спектральных индексов источников и расстоянием, при которой более удаленные радиоисточники характеризуются большими средними значениями низкочастотных спектральных

индексов. Для качественной проверки этого предположения сравним значения $\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle$ для радиогалактик из рассматриваемой выборки 4С со значениями видимой оптической величины $m_v < 18$ и $m_v \geq 18$ соответственно. Результаты сравнения и оценки $\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle$ для неотождествленных радиоисточников и квазаров представлены в табл. 2. Учитывая наличие установленной в работах [55,70,71] корреляции $m_v - z$ и существенное различие средних значений z для радиогалактик и квазаров, полученное для радиогалактик соотношение

$$\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle_{m_v < 18} < \langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle_{m_v \geq 18} \quad (4)$$

также качественно подтверждает предположение о существовании статистической зависимости $\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle = f(z)$, при которой более удаленные радиоисточники характеризуются более крутыми спектрами их протяженных компонент. Возможные физические механизмы укрупнения низкочастотных спектров протяженных компонент источников, расположенных на больших z , рассмотрены в работах [25,52,61,62].

Аналогичная корреляционная зависимость для протяженных структур радиоисточников класса FR-II приведена в работе [72]. Наличие зависимости $\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle = f(z)$ хорошо согласуется также с существованием установленной в работе [73] корреляцией между значениями средних спектральных индексов и угловых размеров $\langle \theta \rangle$ радиоисточников 4С. Для более высокочастотного диапазона 178-1400 МГц экспериментальные свидетельства в пользу существования аналогичных корреляций $\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle = f(z)$ и $\langle \theta \rangle = \varphi(\alpha_{1400}^{178})$ приведены в

Таблица 2

Значения средних низкочастотных спектральных индексов для радиоисточников различных классов в статистически полной выборке 4С

Типы радиоисточников	Количество источников	$\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle$	σ_α
Радиогалактики:			
все	27	0,74±0,02	0,1
$m_v < 18$	14	0,73±0,02	0,07
$m_v \leq 18$	13	0,77±0,03	0,11
Неотождествленные источники	20	0,82±0,02	0,09
Квазары	10	0,94±0,02	0,06

работе [53]. Отметим, что именно предположение о наличии корреляции $\alpha - z$ позволило обнаружить самые удаленные радиогалактики 4C41.17 ($z = 3,8$) [74] и 8C1435+635 ($z = 4,2$) [75].

С другой стороны, поскольку интервал плотностей потоков $S_{min} - S_{max}$ в рассматриваемой выборке радиоисточников (как и в любой другой) ограничен, обнаружение зависимости $\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle = f(z)$ может быть интерпретировано как следствие существования другой фундаментальной статистической зависимости $\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle = f(P)$ между значениями $\alpha_{178}^{16,7}$ и радиосветимости P объектов. Экспериментальное обнаружение корреляции $\alpha - P$ отмечалось во многих работах [76-80]. Некоторые свидетельства в пользу того, что основной зависимостью для протяженных компонент радиоисточников является все же корреляция $\alpha - z$, приведены в работе [81]. При этом отмечается, что эта зависимость выполняется для наиболее удаленных радиоисточников со значениями $z > 0,3$. Напротив, согласно работам [82,83], для радиогалактик со значениями $z < 0,25$ основной зависимостью, вероятно, является корреляция вида $\alpha - P$.

Итак, из сравнения распределений низкочастотных спектральных индексов $\alpha_{178}^{16,7}$ для статистически полных выборок внегалактических радиоисточников различных классов (радиогалактик, квазаров и неотожествленных объектов) из обзоров УТР-2 и 4С и соответствующих средних оценок $\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle$ следует, что в диапазоне частот 16,7-178 МГц:

- протяженные с низкой поверхностной яркостью компоненты радиоисточников, отождествляемых с галактиками и квазарами, характеризуются статистически различимыми значениями средних спектральных индексов;

- наблюдается корреляционная зависимость между средними значениями спектральных индексов $\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle$ и красных смещений $\langle z \rangle$ (или радиосветимости P) внегалактических объектов;

- можно также предположить, что неотожествленные радиоисточники со значениями $\alpha_{178}^{16,7} < 1,0$ представлены в основном слабыми удаленными галактиками, а при значениях $\alpha_{178}^{16,7} > 1,5$ — квазарами.

Подробный обзор статистических связей между различными наблюдаемыми параметрами

внегалактических радиоисточников приведен также в работе [84].

4. Определение относительного содержания радиоисточников с различными типами спектров на частотах ниже 100 МГц

В силу причин, изложенных выше, определение относительного содержания радиоисточников с различными типами низкочастотных спектров выполним на основании статистически полной выборки ($N = 68$) внегалактических источников из обзора 4С. При этом классификацию типа спектра для каждого конкретного радиоисточника выборки будем производить на основании сравнения оценок низкочастотного $\alpha_{178}^{16,7}$ и высокочастотного α_{1400}^{178} спектральных индексов согласно следующих численных критериев:

- интегральный спектр радиоисточника оценивается как степенной (или линейный в масштабе $\log S - \log \nu$) в диапазоне частот 16,7-1400 МГц, т. е. как спектр типа S , если оценки значений $\alpha_{178}^{16,7}$ и α_{1400}^{178} согласуются между собой с точностью до ошибок их определения, т. е. если

$$\alpha_{178}^{16,7} - \Delta\alpha_{инч} < \alpha_{1400}^{178} + \Delta\alpha_{вч} \quad (5)$$

или

$$\alpha_{178}^{16,7} + \Delta\alpha_{инч} > \alpha_{1400}^{178} - \Delta\alpha_{вч};$$

- спектр источника классифицируется как спектр типа $S+$, если на низких частотах (т. е. в диапазоне 16,7-178 МГц) наблюдается более быстрое, чем в диапазоне 178-1400 МГц возрастание плотности потока при понижении частоты, т. е. если

$$\alpha_{178}^{16,7} - \Delta\alpha_{инч} > \alpha_{1400}^{178} + \Delta\alpha_{вч}; \quad (6)$$

- спектр источника оценивался как заваливающийся на низких частотах (т. е. как спектр типа $S-$), если

$$\alpha_{178}^{16,7} + \Delta\alpha_{инч} < \alpha_{1400}^{178} - \Delta\alpha_{вч} \quad (7);$$

Для радиоисточников, значения плотностей потоков которых на частотах 16,7 и 1400 МГц не определены, использовались верхние и нижние оценки значений $\alpha_{178}^{16,7}$ и α_{1400}^{178} соответственно, рассчитанные исходя из значений пороговых плотностей потоков соответствующих радиообзоров.

Полученные численные оценки относительного (n/N) содержания источников с различными типами низкочастотных спектров и соответствующие медианные значения низкочастотного и высокочастотного спектральных

Таблица 3

Относительное содержание радиосточников со спектрами типа S, C+, C- в статистически полной выборке радиосточников из обзора 4C

Тип спектра	S	C+	C-
Относительное содержание	0,63±0,06	0,13±0,04	0,24±0,05
$(\alpha_{178}^{16,7})_{med}$	0,85 ± 0,03 $\sigma=0,13$	0,91 ± 0,04 $\sigma=0,1$	<0,65
$(\alpha_{1400}^{178})_{med}$	0,85 ± 0,03 $\sigma=0,13$	0,56 ± 0,06 $\sigma=0,15$	0,10 ± 0,05 $\sigma=0,15$

индексов $(\alpha_{178}^{16,7})_{med}$ и $(\alpha_{1400}^{178})_{med}$ приведены в табл. 3.

Из данных таблицы следует, что ~60% источников со значениями $S_{178} > 6$ Ян обладают степенными (или так называемыми линейными) спектрами во всем рассматриваемом диапазоне частот 16,7-1400 МГц. Как известно, формирование степенного в широком диапазоне частот интегрального спектра радиосточника возможно вследствие суперпозиции спектров отдельных компонент его структуры, имеющих максимумы на разных частотах [56]. Однако наиболее вероятной причиной формирования степенного спектра в рассматриваемом диапазоне частот является преобладание излучения от протяженной (~100 кпк) оптически тонкой компоненты в структуре источника. Как известно, в этом случае наблюдаемый спектр радиосточника отражает распределение релятивистских электронов по энергиям в его протяженной компоненте.

Полученное значение относительного содержания источников со спектрами типа C+ (~12%) превышает аналогичные оценки, имеющиеся в литературе. Это связано с использованием в настоящей работе наиболее низкочастотных данных, которые отражают все более возрастающий вклад в интегральное излучение плотности потока от протяженных компонент с крутыми спектрами ($\alpha > 1,0$) в структуре радиосточников при понижении частоты наблюдений [85]. Крутые спектры протяженных компонент, возможно, являются результатом синхротронных или обратных комптоновских потерь энергии релятивистскими электронами.

Полученное относительное содержание источников с заваливающимися на низких частотах спектрами (~24%) также значительно отличается от имеющихся в литературе оценок (~5%). Наиболее вероятной причиной такого отличия является уже упоминавшийся нами

эффект наблюдательной селекции, который приводит к заниженной оценке числа радиосточников с заваливающимися на низких частотах спектрами. Как известно, одной из причин наблюдаемых низкочастотных завалов в спектрах радиосточников класса FR-II [86] является эффект синхротронного самопоглощения в компактных ярких деталях (горячих пятнах) их структуры. В работах [87, 88] отмечалось, что вклад компактных деталей в общий поток излучения увеличивается при возрастании светимости радиосточников, т. е. завал спектра на низких частотах должен быть наиболее явно выражен для мощных радиосточников. Отсюда также следует, что численные соотношения между источниками с различными типами спектров должны проявлять зависимость и от величины порогового потока рассматриваемых выборок радиосточников. Отметим, что среди рассмотренных ранее в литературе выборок радиосточников приведенные в настоящей работе данные получены на основании анализа выборки с наиболее низким значением пороговой плотности потока ($S_{178} \geq 6$ Ян).

5. Выводы

В данной работе получены следующие основные астрофизические результаты:

1. Показано, что протяженные компоненты радиосточников, отождествляемых с радиогалактиками и квазарами, характеризуются статистически различными средними значениями низкочастотных спектральных индексов $\alpha_{178}^{16,7}$, определенными в диапазоне частот 16,7-178 МГц. При этом более удаленные объекты характеризуются большими средними значениями $\langle \alpha_{178}^{16,7} \rangle$, что предполагает наличие корреляционной зависимости между значениями $\alpha_{178}^{16,7}$ и красных смещений z (или радиосветимости P) для протяженных внегалактических радиосточников, а также позволяет сле-

вать предположения относительно физической природы неотожествленных радиоисточников, наблюдаемых на самых низких частотах, на основании значений их низкочастотных спектральных индексов. В частности, можно предположить, что неотожествленные радиоисточники со значениями $\alpha_{178}^{16,7} < 1,0$ представлены в основном слабыми удаленными галактиками, а при значениях $\alpha_{178}^{16,7} > 1,5$ – квазарами.

Отметим также, что даже отвлекаясь от вопроса, какая из упомянутых выше зависимостей является основной, наличие эмпирической корреляции $\alpha - z$ для протяженных радиоисточников позволяет использовать значения низкочастотных спектральных индексов в качестве предварительного радиоастрономического критерия поиска объектов с очень большими z , аналогичного критерию по цвету, используемого в оптике.

2. На основании сравнения значений спектральных индексов внегалактических радиоисточников в диапазоне частот 16,7-178 МГц и 178-1400 МГц получены численные оценки относительного содержания объектов с различными типами низкочастотных спектров в статистически полной выборке внегалактических радиоисточников из обзора 4С с плотностями потоков $S_{178} \geq 6$ Ян. Отметим, что относительное содержание источников с различными типами спектров должно зависеть не только от значений пороговых плотностей потоков рассматриваемых выборок радиоисточников, но и, вообще говоря, от их галактических координат, т. е. должно отражать распределение поглощающего излучение газа в Галактике.

Исследования, представленные в настоящей работе, выполнены благодаря гранту U31000, полученного от Международного Научного Фонда.

Литература

- Gower J.F.R., Scott P.F., Wills D. Mem. Roy. Astron. Soc. 1967, 49-144.
- Braude S.Ya., Megn A.V., Ryabov B.P., Sharykin N.K., Zhouck I.M. Astrophys. and Space Sci., 1978, v. 54, p. 3.
- Braude S.Ya., Megn A.V., Rashkovsky S. L., Ryabov B.P., Sharykin N.K., Sokolov K.P., Tkachenko A.P. and Zhouck I.M. Astrophys. and Space Sci., 1978, v. 54, p. 37.
- Braude S.Ya., Megn A.V., Sokolov K.P., Tkachenko A.P. and Sharykin N.K. Astrophys. and Space Sci., 1979, v. 64, p. 73.
- Braude S.Ya., Mirochnichenko A.P., Sokolov K.P. and Sharykin N.K. Astrophys. and Space Sci., 1981, v. 74, p. 409.
- Braude S.Ya., Sharykin N.K., Sokolov K.P. and Zakharenko S.M. Astrophys. and Space Sci., 1985, v. 111, p. 1.
- Braude S.Ya., Sokolov K.P. and Zakharenko S.M. Astrophys. and Space Sci., 1994, v. 213, p. 1.
- Roger R.S., Bridle A. H., Constatin C.H. Astron. J., 1973, v.78, p. 1030.
- Брауде С.Я., Жук И.Н., Мень А.В., Рябов Б.П., Соколов К.П., Шарыкин Н.К. Препринт ИРЭ АН УССР. Харьков, 1976. №68, 57 с.
- Брауде С.Я., Мень А.В., Соколов К.П., Шарыкин Н.К. Препринт ИРЭ АН УССР. Харьков, 1979, №116, 34 с.
- Брауде С.Я., Мирошниченко А.П., Соколов К.П., Шарыкин Н.К. Препринт ИРЭ АН УССР. Харьков, 1980. №148, 29 с.
- Брауде С.Я., Захаренко С.М., Соколов К.П., Шарыкин Н.К. Препринт ИРЭ АН УССР. Харьков, 1984. №253, 24 с.
- Braude S.Ya., Megn A.V., Ryabov B.P., Sharykin N.K., Sokolov K.P., and Zhouck I.M. Astrophys. and Space Sci., 1978, v. 54, p. 145.
- Braude S.Ya., Megn A.V., Sokolov K.P. and Sharykin N.K. Astrophys. and Space Sci., 1979, v. 64, p. 127.
- Braude S.Ya., Mirochnichenko A.P., Sokolov K.P. and Sharykin N.K. Astrophys. and Space Sci., 1981, v. 76, p. 279.
- Braude S.Ya., Sokolov K.P., Sharykin N.K., Zakharenko S.M. Astrophys. and Space Sci., 1995, v. 226, p. 245.
- Conway R.G., Kellermann K.I., Long R.J. Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 1963, v. 125, p. 261.
- Kellermann K.I., Pauliny-Toth I.I.K., Williams P.J.S. Astrophys. J., 1969, v. 157, p. 1.
- Veron M.P., Veron P., Witzel A. Astron. and Astrophys. Suppl. Ser., 1974, v. 13, p. 1.
- Erickson W.C., Cronyn W.M. Astron. J., 1965, v. 142, p. 1156.
- Кардашев Н.С. Астрон. журнал, 1962, т. 39, с. 393.
- Пахольчик А. Радиоастрофизика. Москва, Мир, 1973, 250 с.
- Пахольчик А. Радиогалактики. Москва, Мир, 1980, 239 с.
- Гинзбург В.Л. Теоретическая физика и астрофизика. Москва, Наука, 1975.
- Rees M.J., Setti G. Nature, 1968, v. 219, p. 127-131.

26. Scheuer P.A.G. The physics of radio sources and cosmology. In: Radio astronomy and cosmology. Dordrecht: Reidel D., 1977, p. 343.
27. Stoke J. *Astrophys. J.*, 1979, v. 230, p. 40-48.
28. Conway R.G., Kellermann K.I., Long R.J. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 1963, v. 125, p. 261-268.
29. Kellermann K.I., Pauliny-Toth I.I.K., Williams P.J.S. *Astrophys. J.*, 1969, v. 157, p. 1-34.
30. Laan van der H. *Astron. and Astrophys.*, 1969, v. 3, p. 477.
31. Bennet A.S. *Mem. Roy. Astron. Soc.*, 1962, v. 67, p. 163-172.
32. Laing R.A., Riley J.M., Longair M.S. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1983, v. 204, p. 151.
33. Long R.J., Smith M.A., Stewart P., Williams P.J.S. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1966, v. 134, p. 371-388.
34. Williams P.J.S., Stewart P. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1967, v. 135, p. 319-328.
35. Williams P.J.S., Collins R.A., Caswell J.L., Holden D.J. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1968, v. 139, p. 289.
36. Slee O.B., Siegmann C.B., Mulhall P.S. *Proc. Astron. Soc. of Australia*, 1982, v. 4, p. 278-293.
37. Wall J.V. *Aust. J. Phys.*, 1972, v. 24, p. 1.
38. Cower J.F.R., Scott P.F., Wills D. *Mem. Roy. Astron. Soc.*, 1967, v. 71, p. 49.
39. Fitch L.T., Dixon R.S., Kraus J.D. *Astron. J.*, 1969, v. 74, p. 612.
40. Ehman J.K., Dixon R.S., Kraus J.D. *Astron. J.*, 1970, v. 75, p. 315.
41. Brundage R.R., Dixon R.S., Ehman J.R., Kraus J.D. *Astron. J.* 1971, v. 76, p. 777.
42. Caswell J.L., Crowther J.H. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1969, v. 145, p. 181-196.
43. Bridle A.H., Davis M.M., Fomalont E.B., Lequeux J. *Astron. J.*, 1972, v. 77, p. 405.
44. Соколов К.П. Дисс ...канд. физ.-мат. наук. Москва, 1985, 200 с.
45. Merkelijn J.K., Wall J.V. *Aust. J. Phys.*, 1970, v. 23, p. 575.
46. Bolton J.C., Wall J.V. *Aust. J. Phys.*, 1970, v. 23, p. 789.
47. Bentley M., Haves P., Spencer R.E., Stannard D. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1976, v. 176, p. 275-306.
48. Соколов К.П. *Астроном. журн.*, 1986, т. 63, с. 426.
49. Соколов К.П. *Астроном. журн.*, 1989, т. 66, с. 1121.
50. Sokolov K.P. *Australian J. of Phys.*, 1990, v. 43, p. 263.
51. Pauliny-Toth I.I.K., Kellermann K.I. *Astron. J.*, 1968, v. 73, p. 593.
52. Fonaroff B.L., Longair M.S. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1972, v. 159, p. 119.
53. Blumental G., Miley G. *Astron. Astrophys.*, 1979, v. 80, p. 13.
54. Katgert-Merkelijn J., Lari C., Padrielli L. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1980, v. 40, p. 91-118.
55. Wills D., Lynds R. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1978, v. 36, p. 317.
56. Broderick J.J., Condon J.J. *Astrophys. J.*, 1975, v. 202, p. 596.
57. Murdoch H.S. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1976, v. 177, p. 441.
58. Condon J.J., Jauncey D.L. *Astron. J.*, 1974, v. 79, p. 437.
59. Condon J.J., Jauncey D.L. *Astron. J.*, 1974, v. 79, p. 1220.
60. Kapahi V.K. *Astron. and Astrophys.*, 1978, v. 67, p. 157.
61. Longair M.S., Ryle M., Scheuer P.A.G. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1973, v. 164, p. 243-270.
62. De Young D.S. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 1976, v. 14, p. 447.
63. Miley G. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 1980, v. 18, p. 165.
64. Duffett-Smith P.J., Purvis A. Extended structure in high redshift radio sources. In: Extragalactic radio sources. Dordrecht: Reidel D., 1982, p. 59.
65. Gopal-Krishna, Wiita P.J. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1987, v. 226, p. 53.
66. Moore P.K., Browne I.W.A., Daintree E.J., Noble R.G., Walsh D. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1981, v. 197, p. 325.
67. Perley R.A., Fomalont E.B., Johnston K.J. *Astron. J.*, 1980, v. 85, p. 649.
68. Orr M.J.L., Browne I.W.A. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1982, v. 200, p. 1067.
69. Browne I.W.A., Orr M.J.L., Davis R.J., Foley A., Muxlow T.W.B., Thomasson P. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1982, v. 198, p. 673.
70. Stannard D. *Nature*, 1973, v. 246, №5430, p. 295.
71. Lang K.R., Lord S.D., Johanson J.M., Savage P.D. *Astrophys. J.*, 1975, v. 202, p. 583-590.
72. Laing R.A., Peacock J.A. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1980, v. 190, p. 903-924.
73. Tielens A.G.G.M., Miley G.K., Willis A. G. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1979, v. 35, p. 153-162.
74. Chambers K.C., Miley G.K., van Breugel W. *Astrophys. J.*, 1991, v. 363, p. 21.

75. Lacy M., Miley G.K., Willis A.G., *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1979, v. 35, p. 153.
77. Heesch D.S. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1960, v. 72, p. 368.
78. Bridle A.H., Kestven M.M.J.L., Guindon B. *Astrophys. Lett.*, 1972, v. 11, p. 27.
79. Macleod J.M., Doherty L.H. *Nature*, 1972, v. 283, №5359, p. 88.
80. Veron M.P., Veron P., Witzel A. *Astron. Astrophys.*, 1972, v. 18, p. 82.
81. Katgert-Merkelijn J., Lary C., Padrielli L. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1980, v. 40, p. 91.
82. Meier D.L., Ulrich M.H., Fanti R. et al. *Astrophys. J.*, 1979, v. 229, p. 25.
83. Katgert P., De Ruiter H.R., van der Laan H. *Nature*, 1979, v. 280, №5717, p. 20-23.
84. Allington-Smith J.R., Perryman M.A.C., Longair M.S., Gunn J.E., Westphal J.A. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1982, v. 201, p. 331.
85. Browne I.W.A., Orr M.J.L., Davis R.J., Foley A., Muxlow T.W.B., Thomasson P. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1982, v. 198, p. 673.
86. Fomalont B.L., Riley J.M. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1974, v. 167, p. 31.
87. Readhead A.C.S., Longair M.S. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1975, v. 170, p. 393.
88. Jenkins C.J., McEllin M. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1977, v. 180, p. 219.

The Study of Low-Frequency Spectrum Statistical Properties for Extended Extragalactic Radio Sources of Different Classes.

K.P. Sokolov

Statistical properties of low-frequency spectra determined in the range 16,7 to 178 MHz for extragalactic radio sources indentified with radio galaxies and quasars as well as for unindentified objects are considered on the base of statistically complete sampels of radio sources from the 4C and the UTR-2 sky surveys. The estimates of the low-frequency spectra have been obtained. It has been shown that extended components of radio galaxies and quasars are characterized by statistically distinguishable values of the low-frequency average spectrum indices.