

УДК 524.7-77/33

АНИЗОТРОПИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ РАДИОИСТОЧНИКОВ. I: КАТАЛОГ

© 2009 В. Р. Амирханян

Государственный астрономический институт им. П. К. Штенберга, Москва, 119992 Россия

Поступила в редакцию 21 января 2009 г.; принята в печать 20 мая 2009 г.

Сформирован каталог протяженных внегалактических радиоисточников, состоящий из 10461 объекта. В качестве исходного материала использован список радиоисточников обзора FIRST. 1801 объект отождествлен с галактиками и квазарами обзоров SLOAN и каталога Veron-Veron. Построено распределение позиционных углов осей радиоисточников каталога. Вероятность того, что это распределение равновероятное менее 10^{-7} . На основании этого делается вывод, что до $Z=0.5$ пространственная ориентация осей радиоисточников статистически значимо анизотропна.

Ключевые слова: *радиоисточники*

1. ВВЕДЕНИЕ

Унифицированная морфология галактик делает их прекрасными пробными телами для изучения структуры пространства. Исследования пространственной ориентации галактик начаты в 30-х годах двадцатого столетия английским астрономом Брауном [1]. Брауном [2], Нильсоном [3], Лаубертсом [4], Караченцевым и др. [5] были созданы обширные каталоги, которые включают в себя важнейшие для подобных исследований параметры галактик: позиционные углы и отношения осей. Рейнхардт [6], Нильсон [7], Лаубертс [4], Манджос [8], Парновский и др. [9] провели анализ этих каталогов и убедительно продемонстрировали, что пространственная ориентация галактик не изотропна на масштабах, как минимум, 200 Мпс. Столь же унифицированную и анизотропную структуру мы наблюдаем у внегалактических протяженных радиоисточников. Использование радиоисточников весьма привлекательно, так как позволит подтвердить или опровергнуть результаты, полученные по галактикам на независимой выборке объектов, а также значительно увеличить объем исследуемого пространства. Амирханян [10] попытался использовать такие радиоисточники как индикаторы анизотропии, но уверенного результата не получил, так как имел весьма ограниченную однородную выборку — 298 радиоисточников MG-каталога. Очевидно, что для достижения значимого результата необходим каталог протяженных радиоисточников, сравнимый по объему с каталогами галактик. Однако в настоящее время таких каталогов нет. Именно поэтому, имея конечной целью анализ пространственной ориентации радиоисточников, автор решил сформировать такой каталог,

взяв за основу список объектов обзора FIRST [11]. Непосредственное использование этого каталога невозможно, так как он не содержит информацию о кратности радиоисточников. В нем приведены параметры компонент, но не показана возможная связь между ними.

2. КАТАЛОГ

2.1. Правила отбора

Для решения поставленной задачи важнее минимизировать число ложных объектов, чем найти все реальные радиоисточники. Именно на это ориентированы правила отбора, заложенные в программу **first01**, которая формировала каталог:

- 1) каждый радиоисточник должен состоять не менее, чем из трех компонент;
- 2) интегральный поток каждой компоненты должен быть не менее 2.5 мЯн;
- 3) среднеквадратичное расстояние между компонентами и осью радиоисточника, оптимально проведенной через координаты компонент не должен превышать 0.12Θ (Θ — расстояние между максимально разнесенными компонентами).

При формировании списка компонент, составляющих радиоисточник, автор использовал идеологию кластерного анализа. При этих условиях, в предположении, что все 440046 объектов обзора FIRST с интегральным потоком более 2.5 мЯн не связаны между собой, мы должны обнаружить не более трех ложных радиоисточников с тремя компонентами. Вероятность обнаружить ложный

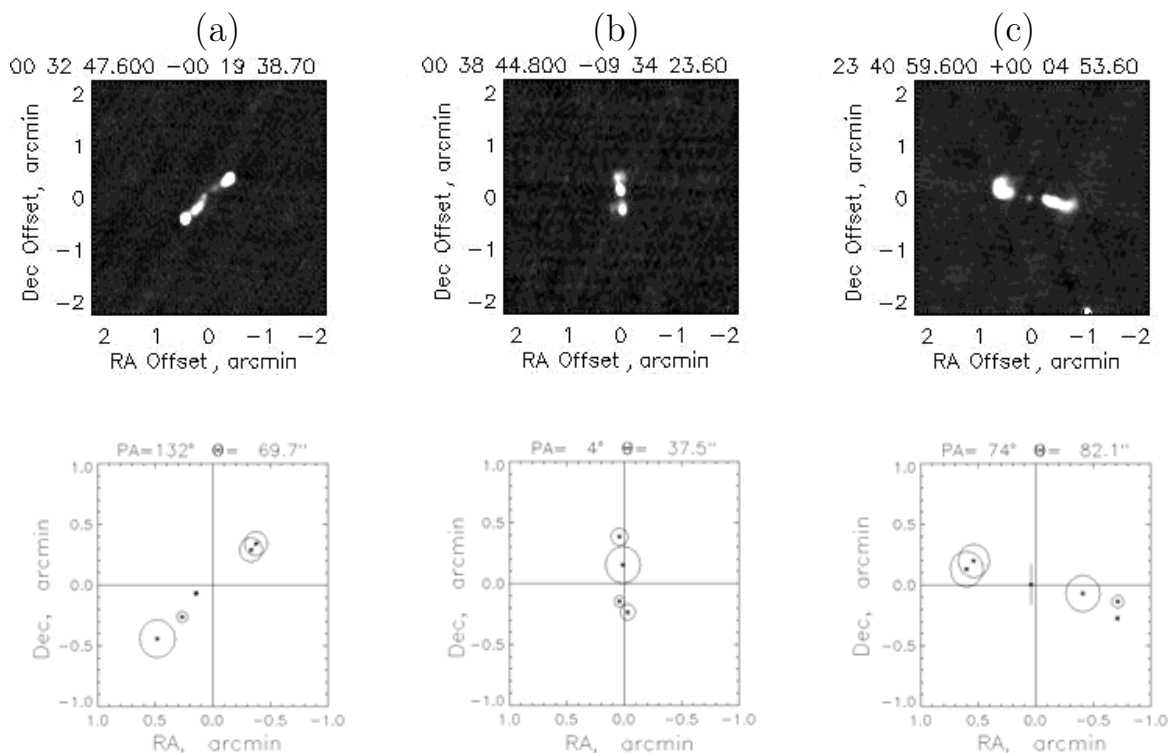


Рис. 1. Изображения радионисточников в обзоре FIRST (верхний ряд) и данным каталоге (нижний ряд). На картах нижнего ряда показаны оси α и δ , пересечение которых совпадает со средними координатами сформированного радионисточника. Звездочки обозначают положение компонент, диаметры колец вокруг звездочек пропорциональны интегральным потокам компонент, крестом отмечена позиция оптической компоненты (правый рисунок).

объект с четырьмя и более компонентами ничтожна. Еще один возможный источник ложных объектов — это очень протяженные радионисточники, у которых расстояние между группами компонент превышает радиус кластеризации $60''$. В этом случае группа компонент, если она удовлетворяет вышеперечисленным правилам отбора, может быть принята программой за независимый радионисточник. Таких объектов немного и большинство из них правилам отбора не удовлетворяют. Программа организовала каталог из 10461 радионисточника. На Рис. 1 показаны примеры сформированных объектов и их радиоизображения в обзоре FIRST. Такая визуальная проверка была сделана для нескольких десятков радионисточников и не показала ни одной ошибки. Одновременно программа отождествляла сформированные радионисточники с объектами обзора SLOAN [12] и каталога Veron-Veron [13]. Если расстояние между средними координатами радионисточника и оптического объекта меньше $30''$ и меньше половины углового размера радионисточника, то такой объект заносится в каталог как возможный оптический компонент. Далее определяется компонента, входящая в состав радионисточника, ближайшая к оптическому объекту, а

также расстояние между ними. Одновременно вычисляется расстояние оптического объекта до оси радионисточника. При дальнейших исследованиях автор считал, что радионисточник имеет оптическое отождествление, если хотя бы одно из этих расстояний менее $3''$. Этому условию удовлетворяет 1801 радионисточник.

2.2. Моделирование каталога

Визуальный контроль ограничен по объему и субъективен. Поэтому для проверки качества работы поисковой программы было сгенерировано несколько имитаций обзора FIRST. Программа `sim_first01` генерировала по заданному закону распределения по небесной сфере определенное число протяженных радионисточников. Число компонент в радионисточниках определялось случайным образом от трех до десяти. Чтобы максимально приблизить модель к реальности, распределения потоков, угловых размеров и разброс компонент относительно оси объекта выбраны близкими к распределениям соответствующих параметров реального каталога. Так как позиционный угол — важнейший параметр радионисточника

для решения поставленной задачи, то программа симуляции позволяла изменять вид заданного распределения позиционных углов для того, чтобы в дальнейшем сравнить с позиционными углами искусственных объектов. Присвоим этому списку объектов номер 1. По завершении генерации, программа составляла общий список *компонент* всех сгенерированных радиоисточников и записывала их координаты и потоки в файл в формате каталога FIRST (список №2). Этот файл обрабатывался программой *first01*, которая составляла список №3 сформированных объектов. Сравнение списков №1 и №3 в нескольких генерациях показало, что порядка 8.5% объектов списка №1 не попадают в список №3, так как у них разброс компонент относительно оси превышает заданный предел (правило отбора 3). Еще примерно 4% объектов отбрасываются, так как расстояние между группами образующих их компонент превышает радиус кластеризации. Ложных объектов в списке №3, которые отсутствуют в списке №1, не обнаружено. Обработка сгенерированных каталогов отчетливо показала, что возникает серьезная проблема при вычислении позиционного угла оси радиоисточника, если его значение близко к 0 или 90 градусам. Это имеет очень простое объяснение. Пусть координаты N компонент относительно центра тяжести радиоисточника есть x_i и y_i . Выражение для тангенса угла наклона при проведении прямой линии через набор точек методом наименьших квадратов обязательно имеет в знаменателе или в числителе $\sum_{i=1}^N x_i^2$ или $\sum_{i=1}^N y_i^2$.

Так как координаты компонент всегда содержат ошибки измерений, эти суммы распределены по χ^2 и вероятность, что они обратятся в нуль ничтожно мала. Следовательно, при приближении реального позиционного угла к 0 или 90 градусам (в зависимости от метода проведения прямой) вероятность правильной оценки угла падает и, следовательно, число объектов гистограммы в этих позициях также будет неуклонно падать. В результате, мы получим искаженное распределение позиционных углов. Чтобы уйти от этих ограничений, программа определяет угол в два этапа. Во первых, по стандартным формулам определяется прямая, имеющая минимальную сумму квадратов расстояний от компонент и вычисляется ее позиционный угол ϕ . Для уточнения угла программа изменяет наклон прямой в пределах $\phi \pm 10^\circ$ и ищет реальный минимум суммы квадратов расстояний. Численные эксперименты показали, что такой способ вычисления снимает проблему определения позиционного угла: ошибки между позиционными углами сгенерированных (список №1) и сформированных объектов (список №3) не зависят от значения угла, а вид заданного и построенного распределения позиционных углов объектов сгенерированного каталога совпадают.

2.3. Формат каталога

Сформированный каталог протяженных радиоисточников имеет структуру, описанную в Таблице.

Таблица. Протяженные радиоисточники

α_{2000}	δ_{2000}	Характеристики источника			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
129.550781	17.674994	97.0	74.2	27.8	
129.540726	17.675444	1.3	3.2	0.0	
129.549530	17.675861	2.5	4.6	0.0	
129.551239	17.675165	3.1	5.5	0.0	
129.562271	17.673082	5.7	14.5	0.0	
129.545731	31.886414	82.6	25.2	27.6	
129.542221	31.886194	3.8	10.2	0.0	
129.546097	31.886360	7.6	7.8	1.0	
129.546127	31.886318	17.7	0.1699	0.2	-0.3
129.550400	31.887083	1.9	9.6	0.0	
129.555511	13.968682	38.1	137.2	52.8	
129.543793	13.953083	21.9	26.5	0.0	

Таблица. (Продолжение)

α_{2000}	δ_{2000}	Характеристики источника			
		(3)	(4)	(5)	(6)
129.554718	13.969610	8.6	8.8	1.0	
129.554718	13.969643	-18.7	2.0134	0.1	6.7
129.568069	13.983055	14.5	17.5	0.0	
129.567520	26.378452	1.2	44.8	115.5	
129.567352	26.374390	13.7	10.9	0.0	
129.567673	26.376307	19.2	53.7	0.0	
129.567749	26.386833	36.0	51.0	0.0	
129.580429	40.770386	14.7	29.5	18.5	
129.579269	40.767113	2.4	7.3	0.0	
129.580505	40.770500	1.9	3.1	0.0	
129.582016	40.775028	1.7	8.1	0.0	
129.586914	17.208118	73.0	43.1	90.5	
129.581558	17.207390	8.3	33.1	0.0	
129.585205	17.206223	2.5	13.1	0.0	
129.593689	17.210306	10.9	44.3	0.0	
129.595459	12.498256	80.2	18.8	179.5	
129.592773	12.497806	29.0	35.6	0.0	
129.595444	12.498250	44.7	51.2	1.0	
129.595474	12.498255	-19.1	1.6294	0.1	-0.0
129.598053	12.498694	78.5	92.7	0.0	
129.610794	0.017126	21.9	59.2	29.7	
129.607422	0.010861	6.0	8.9	0.0	
129.610001	0.012806	6.2	7.9	0.0	
129.614105	0.025889	11.2	12.9	0.0	

Информация о каждом радиоисточнике расположена в блоках. В первой строке каждого блока описаны параметры объекта как целого:

- 1) среднее прямое восхождение в градусах;
- 2) среднее склонение в градусах;
- 3) позиционный угол оси в градусах;
- 4) угловой размер в угловых секундах (за угловой размер принимается расстояние между наиболее разнесенными компонентами радиоисточника);
- 5) интегральный поток в мЯн (поток радиоисточника — это сумма интегральных потоков его

компонент). Три последних объединены в колонке “Характеристики источника”.

Каждая следующая строка — информация о каждой компоненте, образующей данный радиоисточник. Эти данные взяты из каталога FIRST:

- 1) прямое восхождение в градусах;
- 2) склонение в градусах;
- 3) поток неразрешенной составляющей компоненты в мЯн;
- 4) интегральный поток компоненты в мЯн;

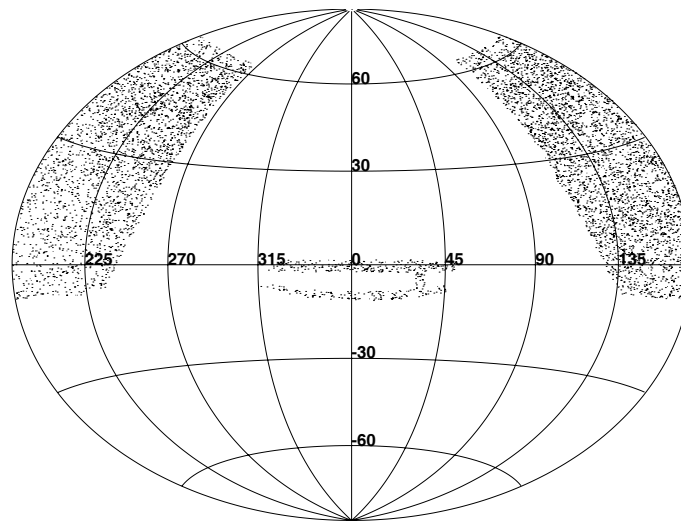


Рис. 2. Распределение радиоисточников каталога по небесной сфере.

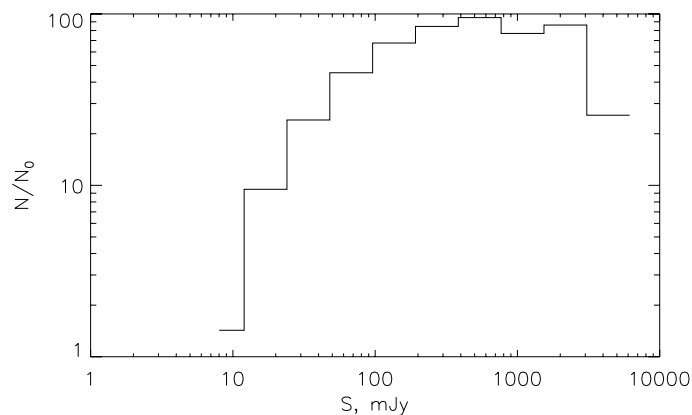


Рис. 3. Дифференциальное распределение радиоисточников каталога по потоку, нормированное на статистику в изотропном пространстве Евклида.

5) ноль, если компонента не отождествлена с оптическим объектом, и единица, если такое отождествление есть. Единица является признаком того, что следующая строка несет информацию об оптическом объекте:

- 1) прямое восхождение в градусах;
- 2) склонение в градусах;
- 3) звездная величина в фильтрах V или g. Отрицательная звездная величина означает, что объект является квазаром. Если абсолютная величина параметра равна 1, то звездную величину объекта в фильтрах V или g найти не удалось;
- 4) красное смещение;
- 5) расстояние между оптическим объектом и отождествленной радиокомпонентой в угл. сек;
- 6) Расстояние между оптическим объектом и осью радиоисточника в угл. сек.

В этом формате каталог можно найти на странице Специальной астрофизической обсерватории

РАН по адресу: ftp://ftp.sao.ru/cifs/cats/cats/FIRST_Amir/f1912kak5.txt.

3. СТАТИСТИКА КАТАЛОГА

На Рис. 2 показано распределение радиоисточников каталога по небесной сфере, которое совпадает с областью обзора FIRST. На Рис. 3 приведено дифференциальное распределение потоков радиоисточников каталога, нормированное на “статистику Евклида”. На Рис. 4 — распределение радиоисточников по угловым размерам. Полученная отсюда плотность вероятности распределения угловых размеров радиоисточников каталога в диапазоне $20'' - 200''$ удовлетворительно аппроксимируется функцией:

$$P(\theta)d\theta = 0.025e^{-0.000247(\theta-3.3)^2}d\theta.$$

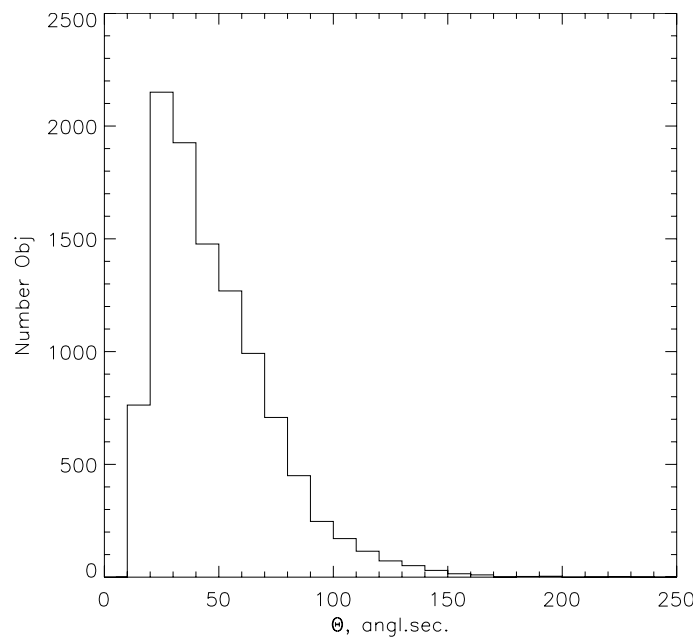


Рис. 4. Распределение радиосточников каталога по угловому размеру.

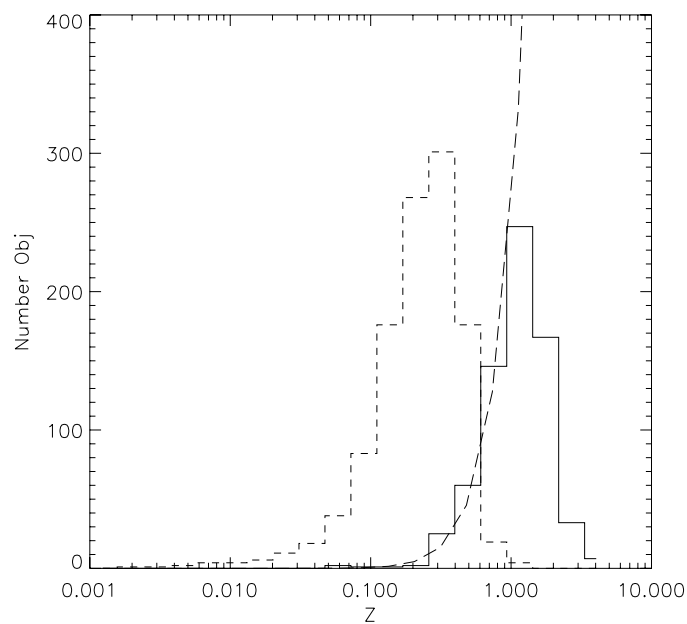


Рис. 5. Распределение отождествленных радиосточников каталога по красному смещению. Галактики показаны коротким штрихом, квазары — сплошной линией. Длинным штрихом показана расчетная зависимость в модели Эйнштейна—де Ситтера.

На Рис. 5 приведено распределение отождествленных радиосточников по красному смещению: галактики (короткий штрих) и квазары (сплошная линия). Здесь же показана зависимость числа объектов от красного смещения в модели Эйнштейна—де Ситтера (длинный штрих). Очевидно, что прекращение роста и быстрый спад числа объектов с увеличением Z объясняется аппаратурными ограничениями оптических наблюдений, а не

уменьшением их плотности. На малых Z расчетная зависимость неплохо согласуется с экспериментом, что говорит об отсутствии существенных эффектов селекции при формировании каталога. Очень любопытна зависимость “угловой размер—красное смещение” (Рис. 6). Здесь же показаны зависимости в моделях Евклида (штриховая линия) и Эйнштейна—де Ситтера (сплошная линия)

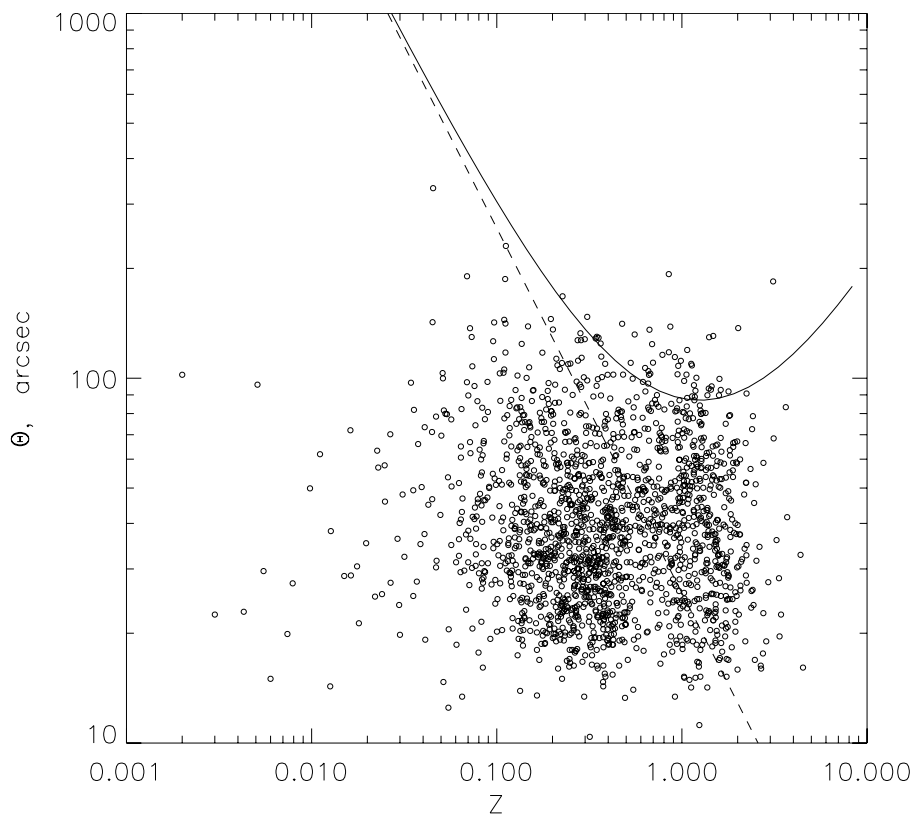


Рис. 6. График “угловой размер—красное смещение”. Здесь же показаны зависимости в моделях Евклида (штриховая линия) и Эйнштейна—де Ситтера (сплошная линия) для линейного размера радиосточника 500 Кпс.

для линейного размера радиосточника 500 Кпс. Легг [14] и Майли [15] построили эту зависимость, используя объекты 3CR-каталога и показали, что верхняя граница графика по угловому размеру хорошо описывается моделью Евклида ($\theta \sim 1/Z$). Чтобы объяснить разногласие этого результата с основными моделями пространства они предположили эволюцию линейных размеров радиосточников вида $D \sim (1 + Z)^{-1.5}$. Амирханян [16] показал, что наблюдаемая верхняя граница этого графика объясняется эффектом селекции из-за ограниченной чувствительности обзоров и анизотропной диаграммы излучения радиосточников. Так как порог обнаружения обзора FIRST на три порядка ниже, чем в 3CR, то граница селекции отодвинулась далеко вверх по красному смещению. На Рис. 6 хорошо видно, что теперь верхний предел диаграммы существенно лучше согласуется со стандартной моделью, чем с моделью Евклида. Но оценить параметры модели даже по 1801 объекту пока сложно.

имеет $\chi^2=314.4$, а вероятность, что оно изотропное меньше 10^{-7} . Неизбежное следствие этого утверждения — пространственная ориентация осей радиосточников анизотропна. Возникает естественный вопрос — какая область пространства анизотропна? Распределение позиционных углов осей радиосточников, красные смещения которых известны (Рис.7b), подобно распределению всей выборки. А вот распределения позиционных углов осей радиосточников с известным красным смещением, отождествленных с 1112 галактиками (Рис.7c) и с 691 квазаром (Рис.7d) заметно отличаются друг от друга — галактики демонстрируют гораздо большую неравномерность, чем квазары. Означает ли это, что основной вклад в неравномерность распределения вносят галактики и анизотропия простирается только до $Z \sim 0.5-1$? Ответа на этот вопрос автор пока не знает. И второй (осторожный) вывод: положение минимума гистограммы около 0° означает, что оси радиосточников в основном ориентированы в направлении экватора.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На Рис. 7а показано распределение позиционных углов осей радиосточников. Распределение

БЛАГОДАРНОСТИ

В заключение автор благодарит И. Д. Караченцева за плодотворное обсуждение этой работы.

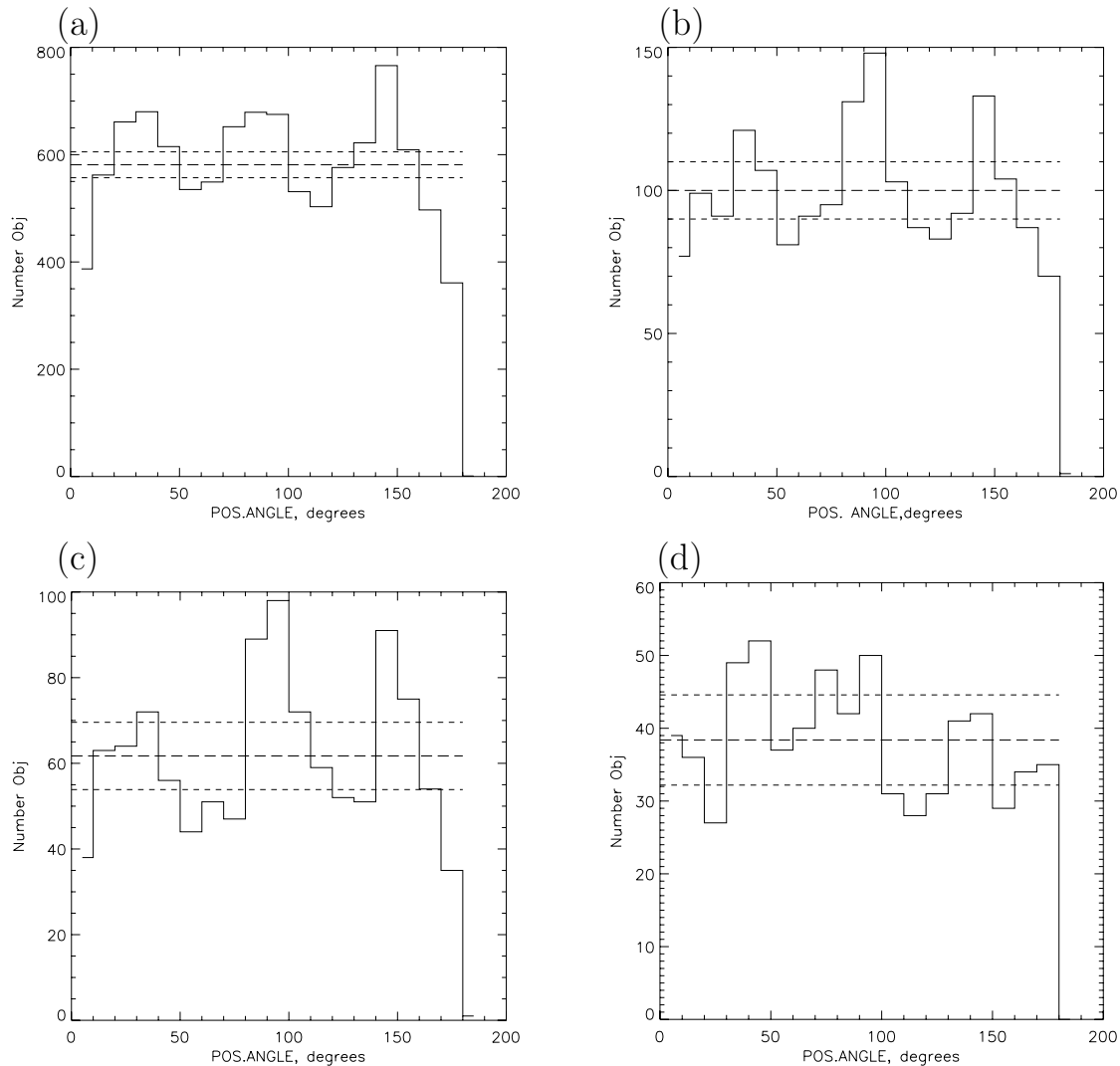


Рис. 7. Распределения позиционных углов радиосточников каталога. Штриховыми линиями показаны средний уровень и диапазон ошибок в предположении равномерного распределения углов. Распределение позиционных углов радиосточников каталога — (а), распределение позиционных углов радиосточников каталога с известным Z — (б), распределения позиционных углов радиосточников каталога с известным Z , отождествленных с галактиками — (с), гистограмма распределения позиционных углов радиосточников каталога с известным Z , отождествленных с квазарами — (д).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. G. Brawn, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **99**, 534 (1938).
2. F. G. Brawn, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **127**, 517 (1963).
3. P. Nilson, *Ann. Uppsala astron. Observ.* **6**, 1 (1973).
4. A. Lauberts, *The ESO/Uppsala Survey of the ESO(B) Atlas.* (1982).
5. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and S. L. Parnovsky, *Astron. Nachr.* **314**, 97 (1993).
6. M. Reinhardt, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **156**, 151 (1972).
7. P. Nilson, *Rep. Uppsala astron. Observ.* **3**, 1 (1974).
8. А. В. Манджос, А. Я. Грегуль, И. Ю. Изотова и В. В. Тельнюк-Адамчук, *Астрофизика* **26**, 321 (1987).
9. S. L. Parnovsky, I. D. Karachentsev, and V. E. Karachentseva, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **268**, 665 (1994).
10. V. R. Amirkhanian, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **37**, 119 (2000).
11. R. L. White, R. H. Becker, D. J. Helfand, and M. D. Gregg, *Astronom. J.* **475**, 479 (1997).
12. <http://cas.sdss.org/astro/en/tools/crossid/crossid.asp>
13. M. P. Veron-Cetty and P. Veron, *Astronom. and Astrophys.* **455**, 773 (2006).
14. T. H. Legg, *Nature* **226**, 65 (1970).
15. G. K. Miley, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **152**, 477 (1971).
16. V. R. Amirkhanyan, *Сообщения САО РАН* **61**, 112 (1989).

ANISOTROPY OF THE SPACE ORIENTATION OF RADIO SOURCES. I: THE CATALOG**V. R. Amirkhanyan**

A catalog of extended extragalactic radio sources consisting of 10461 objects is compiled based on the list of radio sources of the FIRST survey. A total of 1801 objects are identified with galaxies and quasars of the SDSS survey and Veron-Veron catalog. The distribution of the position angles of the axes of the radio sources of the catalog is determined, and the probability that this distribution is equiprobable is shown to be less than 10^{-7} . This result implies that at Z equal to or greater than 0.5 the spatial orientation of the axes of radio sources is anisotropic at a statistically significant level.

Key words: radiosources