

УДК 524.7

А. В. Тугай, Ю. Н. Кудря

Астрономическая обсерватория
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко,
04053 Киев, ул. Обсерваторная, 3

Объединение массивов расстояний и пекулярных скоростей для галактик каталогов Mark III и RFGC

С использованием единой зависимости Талли—Фишера вычислены расстояния и пекулярные скорости для 3530 спиральных галактик из каталога Mark III и выборки Disco из каталога RFGC. Проведено сравнение расстояний единой системы с расстояниями в Mark III и полученными ранее расстояниями до галактик Disco.

ОБ'ЄДНАННЯ МАСИВІВ ВІДСТАНЕЙ ТА ПЕКУЛЯРНИХ ШВИДКОСТЕЙ ДЛЯ ГАЛАКТИК КАТАЛОГІВ MARK III ТА RFGC, Тугай А. В., Кудря Ю. М. — З використанням єдиної залежності Таллі—Фішера обчислені відстані та пекулярні швидкості для 3530 спіральних галактик з каталогу Mark III і вибірки Disco з каталогу RFGC. Проведене порівняння відстаней єдиної системи з відстанями в Mark III та отриманими раніше відстанями до галактик Disco.

UNIFICATION OF DISTANCES AND PECULIAR VELOCITIES ARRAYS FOR GALAXIES OF THE MARK III AND RFGC CATALOGUES, by Tugay A. V., Kudrya Yu. N. — The distances and peculiar velocities for 3530 spiral galaxies from the Mark III catalog and the Disco sample from the RFGC catalog are computed with the use of the unified Tully—Fisher relation. We compare the unified system distances with the distances in Mark III and the distances of the Disco galaxies obtained earlier.

ВВЕДЕНИЕ

Для исследования строения и эволюции крупномасштабных структур во Вселенной необходимы большие массивы однородных данных о расстояниях до внегалактических объектов и их пекулярных скоростях. Один из наиболее массовых методов их определения основывается на эмпирической зависимости Талли—Фишера (ТФ) для спиральных галактик [11]. С использованием этой зависимости был создан каталог расстояний и пекулярных скоростей Mark III для примерно 2500 галактик [12]. На основе пекулярных скоростей этого каталога было вычислено усредненное поле плотности материи методом POTENT [6].

В работе [7] была обоснована возможность использования видимых с ребра спиральных галактик поздних типов для изучения крупномасштабных движений галактик. В частности, тонкие дисковые галактики демонстрируют тесную корреляцию между линейным диаметром и шириной линии H I 21 см, что позволяет измерять расстояния до них без выполнения детальной фотометрии. Для проведения таких исследований был создан Каталог плоских галактик, видимых с ребра, FGC [10], и позднее — его обновленная версия RFGC [8]. На основе выборки из RFGC-галактик с известными красными смещениями и ширинами линии H I (выборка Disco) поле пекулярных скоростей изучалось в дипольном, квадрупольном и октупольном приближениях [1, 5]. Список расстояний и пекулярных скоростей для 1327 плоских галактик Disco опубликован в работе [9].

При создании Mark III и RFGC использовались альтернативные критерии отбора галактик, поэтому каталоги имеют небольшое пересечение (236 общих для галактик Mark III и Disco). Объединение этих каталогов дало бы единый массив расстояний и пекулярных скоростей для более чем 3500 спиральных галактик. Выборка Disco является более глубокой по сравнению с Mark III: средние радиальные скорости $\langle V_{зк} \rangle$ в системе микроволнового фона равны 4264 и 5987 км/с для Mark III и Disco соответственно. Объединенному массиву данных соответствует средняя глубина примерно 4800 км/с.

Объединение массивов данных усложняется их неоднородностью, различием состава данных и методов вычисления расстояний. Авторы Mark III вычисляли расстояния по TФ-зависимости на основании звездных величин, полученных путем фотометрии. Для галактик Disco пока нет таких данных, однако есть точные измерения угловых диаметров. На основании этих данных расстояния вычислялись методом обобщенной многопараметрической TФ-зависимости в ее варианте линейный диаметр — ширина линии [1, 5] (см. также обзорную работу [2]).

В настоящей работе сделана первая попытка построить единый массив расстояний и пекулярных скоростей для объединенной выборки Mark III + Disco на основе единой TФ-зависимости. В качестве основы для объединения приняты фотографические звездные величины B_T из RFGC, вычисленные на основе оригинальных измерений диаметров, оценок морфологического типа и поверхностной яркости [3, 4].

ВЫБОРКИ ДАННЫХ И ЗАВИСИМОСТЬ ТАЛЛИ—ФИШЕРА

При создании каталога Mark III использовались шесть выборок спиральных галактик. Детальное описание выборок Mark III приведено в работе [12]. Ниже мы приводим сокращенное обозначение, авторов выборки, количество объектов, описание распределения галактик по небу и средние радиальные скорости $V_{зк}$. Мы использовали для исследования набор файлов с индивидуальными расстояниями для 2439 спиральных галактик, помещенный на сайте Стэнфордского университета (redshift.stanford.edu/MarkIII).

1. HMCL (Хан, Моулд и др.) 421 галактика 31 скопления, 18 северных и 13 южных; 5435 км/с (шесть галактик выборки НМ входят в нее дважды; мы исключили повторные вхождения, приняв во внимание, что пять из них входят также и в другие выборки).

2. W91CL (Виллик) 156 галактик 10 скоплений северного неба; 5544 км/с.

3. MAT (Мэтьюсон и др.) 1355 южных галактик поля; 3796 км/с.

4. W91PP (Виллик) 326 галактик поля в районе Персея—Рыб; 5670 км/с.

5. CF (Курто и Фабер) 321 галактика северного неба; 5779 км/с.

6. A82 (Ааронсон и др.) 359 близких галактик; 1825 км/с.

Звездные величины в выборках NMCL и MAT получены на основании ПЗС-фотометрии в I -полосе; в W91CL, W91PP и CF — в r -полосе; в A82 — на основании фотоэлектрических измерений в H -полосе. Для галактик из NM, W91CL, W91PP, A82 измерялись ширины линии $\lambda = 21$ см, для CF ширины вычислялись по оптическим кривым вращения, для MAT использовались оба метода.

Авторы каталога записывают ТФ-зависимость в виде

$$M = A - b\eta, \quad (1)$$

где M — абсолютная звездная величина; $\eta = \lg w - 2.5$, w — ширина линии $\lambda = 21$ см, A и b — параметры. При известных A и b расстояния вычисляются по видимым звездным величинам m в соответствии с формулой

$$m = M + 5\lg R. \quad (2)$$

В Mark III используются нестандартные абсолютные величины, они определяются из (2), если расстояние измерять в км/с.

Приведенные в Mark III ширины исправлены за космологическое расширение и за наклон плоскости галактики к лучу зрения. Видимые величины исправлены за внутреннее и галактическое поглощение и за космологическое расширение [12]. Необходимо подчеркнуть, что значения m и η для общих галактик двух разных выборок каталога могут значительно различаться. Например, систематическое различие звездных величин галактик выборок NMCL, с одной стороны, и CF, W91CL и W91PP — с другой стороны по данным авторов составляет 1.31. Случайная составляющая разниц этих величин достигает 0.27. Среднее квадратичное отклонение величин η достигает 0.052 от линии регрессии при сравнении выборок NMCL и MAT.

В работе [12] приводятся формулы преобразования m и η в общие системы, которые совпадают с системами выборки NMCL. Эти формулы получены путем сравнения m и η разных выборок на массиве общих галактик.

Для каждой из шести выборок авторы Mark III построили ТФ-зависимости трех типов. Кроме прямой зависимости (1), использовалась обратная ТФ-зависимость и прямая зависимость с учетом эффекта Малмквиста. Каждому типу зависимости соответствует своя оценка расстояния. Некоторые из галактик входят в две, три или четыре выборки каталога. В результате для одной галактики в каталоге Mark III можно найти до 12 оценок расстояний.

Выборка Disco также составлялась по данным из разных источников (см. [9] и имеющиеся там ссылки). Она содержит 1327 галактик, которые довольно равномерно распределены по небу. За отсутствием достаточного количества общих галактик в подвыборках Disco расхождение систем ширин не исследовалось и принималась единая их система. Ширины линии $\lambda = 21$ см корректировались за космологическое расширение и турбулентность [9]. Для галактик каталога RFGC пока нет измеренных видимых величин. Приведенные в каталоге звездные величины B_T вычислялись на основе оригинальных измерений видимых диаметров и оценок поверхностной яркости и морфологического типа путем согласования со значениями фотографических величин в каталоге RC3 на выборке общих галактик [4]. При этом, поскольку измерения диаметров проводились на разном фотографическом материале (на атласах POSS-I для северной части каталога и ESO/SERC для его южного продолжения), то диаметры были предваритель-

но сведены к единой системе POSS-I, близкой к системе a_{25} [3]. Мы учитывали поправки звездных величин за поглощение, приведенные в RFGC.

ПОСТРОЕНИЕ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ РАССТОЯНИЙ

В этой работе мы построили единую систему расстояний по единой прямой ТФ-зависимости для объединенной выборки Mark III + Disco. Объединение данных проводилось следующим образом.

1. Значения m и η галактик Mark III были пересчитаны в единую систему в соответствии с формулами табл. 6 в работе [12]. При этом из двух возможных вариантов пересчета η для выборки CF мы выбрали линейную (а не квадратичную) зависимость. Значения радиальных скоростей V_{3K} для общих галактик в разных выборках Mark III, как и значения m и η , различны. Однако их дисперсия существенно меньше, поэтому этими различиями мы пренебрегаем, считая что для всех выборок, в том числе и выборки Disco, значения V_{3K} принадлежат одной системе.

2. В полученном после пересчета едином массиве данных m , η , V_{3K} появились кратные вхождения галактик. Поскольку предполагалось, что данные уже принадлежат общим системам, было проведено усреднение кратных данных. В итоге каждой галактике в Mark III был сопоставлен один набор m , η , V_{3K} .

3. Из 1327 галактик выборки Disco имеется 236 галактик, которые входят также в различные выборки Mark III. На основании данных об этих галактиках были построены методом наименьших квадратов (МНК) линейные зависимости m и η в общих системах от соответствующих значений в системах Disco:

$$\eta_0 = (0.8623 \pm 0.0086)\eta_{\text{Disco}} + (0.0603 \pm 0.0015), \quad \sigma_{\eta} = 0.021, \quad (3)$$

$$m_0 = (1.083 \pm 0.037)m_{\text{Disco}} + (-3.70 \pm 0.55), \quad \sigma_m = 0.54. \quad (4)$$

Линейные регрессии (3), (4) показаны на рис. 1.

4. По линейным зависимостям (3) и (4) значения m и η галактик Disco были переведены в общие системы Mark III. Образовавшиеся двойные наборы данных m , η , V_{3K} для 236 общих галактик были усреднены, и в

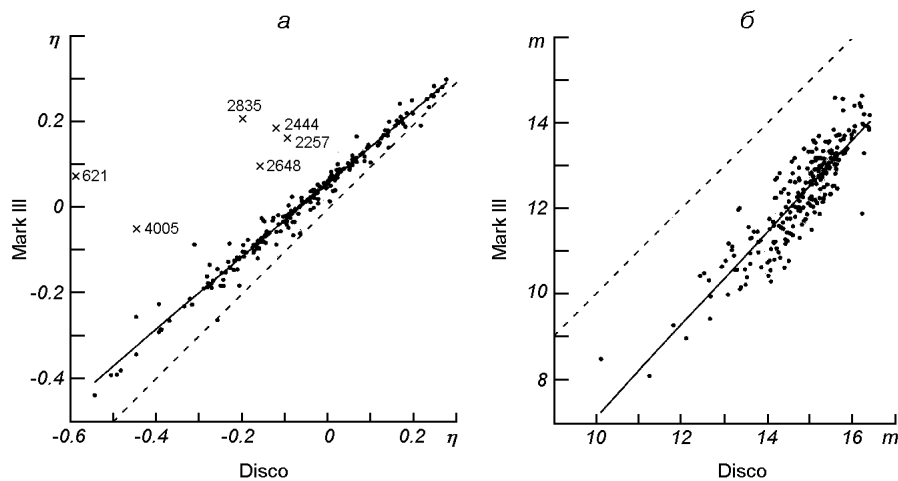


Рис. 1. Коррелятивная связь значений параметров общих галактик из выборок Disco и Mark III: а — для параметра η , б — для звездных величин m . Сплошные линии — регрессии (3), (4), штриховые — линии равных значений. При построении регрессии для параметра η шесть галактик (RFGC 621, 2257, 2444, 2648, 2835, 4005) были отброшены по правилу 3σ

Таблица 1. Параметры ТФ-зависимостей для различных выборок

Выборка	N	σ_M	$A \pm \Delta A$	$b \pm \Delta b$
Mark III + Disco	3530(9)	0.655	-5.531 ± 0.011	7.143 ± 0.071
Mark III	2436(7)	0.597	-5.578 ± 0.013	7.653 ± 0.084
Disco	1327(2)	0.700	-3.326 ± 0.021	5.207 ± 0.100

результате получен объединенный массив данных для 3530 галактик.

5. По значениям m , η , V_{3K} в общих системах для галактик объединенной выборки Mark III + Disco была построена по МНК с единичными весами прямая ТФ-зависимость (1). Минимизировалась сумма квадратов разностей $m - A + b\eta - 5\lg V_{3K}$. Параметры ТФ-зависимости приведены в первой строке табл. 1. Во второй графе таблицы указаны полные объемы выборок галактик, а в скобках — количество галактик с отрицательной скоростью V_{3K} , которые исключались при построении ТФ-зависимости.

6. Используя найденные значения параметров ТФ-зависимости, были вычислены расстояния и пекулярные скорости $V_{pec} = V_{3K} - R$ для всех 3530 галактик.

Полученные расстояния мы сравнивали с расстояниями до галактик Mark III, вычисленными по прямой ТФ-зависимости [12] и до галактик Disco [9], которые будем обозначать соответственно R_{1M} и R_{1D} .

Во второй строке табл. 1 приведены параметры ТФ-зависимости, построенной только на основании галактик Mark III в общих системах величин m , η , V_{3K} . Соответствующие расстояния обозначим R_{2M} . В третьей строке даны параметры ТФ-зависимости для галактик Disco в «своих» системах этих величин. Расстояния, вычисленные по этой зависимости, обозначим R_{2D} .

Для расстояний из объединенного массива, представляющих собой основной результат нашей работы, мы используем обозначение R_3 .

СРАВНЕНИЕ РАССТОЯНИЙ

Мы провели сравнение модулей расстояний $\mu(R_3) = 5\lg R_3$ с модулями расстояний $\mu(R_1)$. Результаты сравнения представлены в табл. 2. В ней приведен коэффициент корреляции r , среднее квадратичное отклонение (СКО) σ_μ модулей расстояний от линии МНК-регрессии $\mu(R_1) = k\mu(R_3) + b$, параметры k и b регрессии и их ошибки на уровне 1σ . Для оценки степени согласия расстояний R_3 и R_1 мы сравнили σ_μ из табл. 2 со следующими величинами.

1. СКО модулей расстояний R_{1M} для общих галактик 14 пар выборок Mark III (пара A82 — W91PP не имеет пересечения). Оказалось, что эта величина изменяется от 0.51 для пары A82 — MAT (81 галактика) до 0.15 для пары W91CL — W91PP (26 галактик), что соответствует относительным погрешностям расстояний 24 и 7 %.

2. СКО модулей расстояний для общих галактик Mark III и Disco (236 галактик, но учитывалась кратность вхождения в Mark III, всего 284 оценки расстояний). Это значение равно 0.54. Видно, что σ_μ находится в пределах от 0.09 до 0.27 (от 4 до 12 % в пересчете на относительную погрешность расстояний) при сравнении модулей расстояний R_3 и R_1 для галактик выборок Mark III. Для галактик Disco $\sigma_\mu = 0.45$, что существенно больше, чем для выборок Mark III (в 1.7 раза больше наилучшего значения

Таблица 2. Результаты сравнения модулей расстояний R_3 с модулями расстояний R_{1M} и R_{1D}

Выборка	r	σ	k	b	$F_{k=1}$	$F_{b=0}$	$F_{k=1,b=0}$
Disco	0.950	0.45	0.945 ± 0.009	0.92 ± 0.16	41	33	55
HMCL	0.986	0.16	1.036 ± 0.009	-0.67 ± 0.16	17.1	17.7	9.5
W91CL	0.993	0.16	1.011 ± 0.010	-0.19 ± 0.18	1.3	1.2	0.7
MAT	0.988	0.18	1.059 ± 0.005	-1.09 ± 0.08	167	186	150
W91PP	0.994	0.09	0.992 ± 0.006	0.18 ± 0.11	1.9	2.7	18.7
CF	0.992	0.13	1.011 ± 0.007	-0.18 ± 0.13	2.6	1.8	13.6
A82	0.983	0.27	1.008 ± 0.010	-0.09 ± 0.16	0.7	0.3	4.7

для выборки A82). Однако это значение не превышает наибольшего значения 0.51 СКО модулей расстояний в Mark III для общих галактик пар выборок и значения 0.54 СКО модулей расстояний для общих галактик Mark III и Disco.

Исследуем систематические различия используемых систем расстояний. В табл. 2 указаны значения статистики F для проверки по критерию Фишера трех гипотез: 1) $k = 1$, 2) $b = 0$ и 3) $k = 1, b = 0$. Принятие этих гипотез означает соответственно пропорциональность, степенную зависимость $R_1 = R_3^k$ и тождественность систем расстояний. Если задаться уровнем доверительной вероятности 95 %, то принять гипотезу тождественности систем модулей расстояний R_{3M} и R_{1M} можно только для выборки Виллика W91CL (F в таблице следует сравнивать со значением $F = 3.00$). Для четырех выборок Mark III из шести (кроме HMCL и MAT) можно принять либо гипотезу $k = 1$, либо $b = 0$ (сравнивать со значением $F = 3.84$). Системы модулей расстояний R_{3D} и R_{1D} до галактик Disco существенно различаются, причем ни одну из указанных гипотез принять нельзя.

Для того чтобы оценить, в какой степени это зависит от различия методов построения расстояний, и в какой степени являются следствием объединения данных Disco и Mark III, мы провели попарное сравнение расстояний R_{1D} , R_{2D} и R_{3D} (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что отличие методов вычисления расстояний, а именно по обобщенной многопараметрической ТФ-зависимости линейный размер — ширина линии и по обычной ТФ-зависимости (1), приводит к существенной случайной составляющей разниц расстояний, а приведение к единым системам звездных величин и параметров η приводит к появлению нелинейности. При этом нетрудно увидеть, что если расстояния R_{2D} и R_{3D} до одной и той же галактики вычисляются по двум различным ТФ-зависимостям вида (1) на основании оценок m_1 и m_2 в разных системах звездных величин, связанных линейной зависимостью вида $m_1 = km_2 + b$, то расстояния связываются степенной зависимостью $R_2 = \text{const}(R_3)^{1/k}$. Нелинейность тем больше, чем больше отличие k от единицы. Это и видно из рис. 2, *в*, поскольку $k = 1.083$ в соответствии с (4), причем отклонение от линейности становится заметным при $V_{3K} = (8000—10000)$ км/с.

Зависимости R_{1D} от R_{3D} характерна и нелинейность, и существенная случайная составляющая. (Заметим, что галактика RFGC1396 имеет $R_{3D} = 30577$ км/с и не поместилась в выбранные границы R_{3D} на рис. 2, *а*, *в*.)

Для галактик Mark III аналогичная нелинейность не появляется, так как для всех выборок, кроме A82, $k = 1$. Для выборки A82 $k \neq 1$, но нелинейность не проявляется вследствие близости выборки ($\langle V_{3K} \rangle = 1825$ км/с).

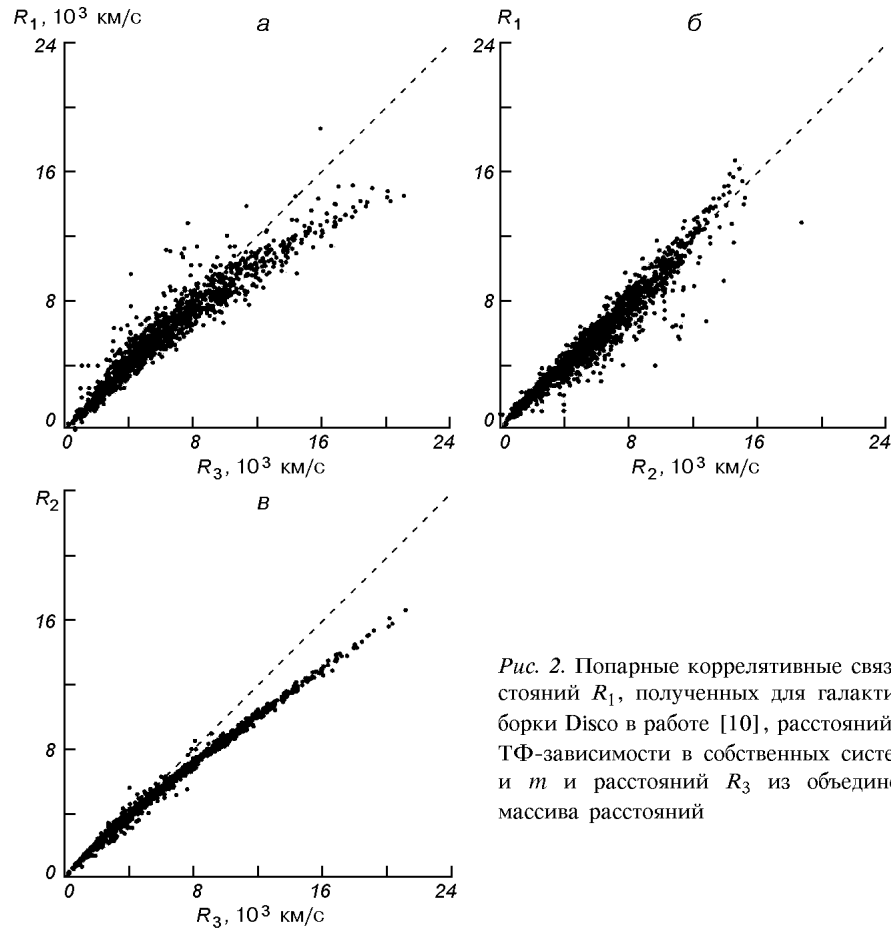


Рис. 2. Парные коррелятивные связи расстояний R_1 , полученных для галактик выборки Disco в работе [10], расстояний R_2 по ТФ-зависимости в собственных системах η и m и расстояний R_3 из объединенного массива расстояний

ВЫВОДЫ

В нашей попытке объединения массивов данных для выборок Mark III и Disco мы избрали более простой способ, чем составители Mark III при объединении данных шести выборок. Мы построили единую ТФ-зависимость для галактик Mark III и Disco на основании звездных величин и параметров η , пересчитанных в общие системы каталога Mark III. Формулы пересчета выведены по общим галактикам Mark III и Disco.

По общей ТФ-зависимости мы вычислили расстояния для галактик объединенной выборки и сравнили с расстояниями в Mark III и в работе [9]. Отличие модулей расстояний в среднем не превышает средних квадратичных отличий расстояний до общих галактик, полученных по ТФ-зависимостям для каждой из подвыборок.

Оказалось, что зависимость «старых» расстояний от «новых» для галактик Disco имеет большую дисперсию по сравнению с аналогичными зависимостями для галактик Mark III и нелинейность, заметную при $R > 8000 \text{ км/с}$. Причиной нелинейности является существенное отличие звездных величин Mark III и RFGC. Поэтому более качественное объединение данных двух каталогов возможно после фотометрических исследований галактик каталога RFGC или после тщательного исследования систем исходных данных двух каталогов и построения систем, более симметричных по отношению к обоим каталогам.

Полученные нами единые расстояния и пекулярные скорости в системе микроволнового фона для 3530 галактик объединенной выборки Mark III+Disco на основании единой ТФ-зависимости могут быть использованы для изучения крупномасштабных потоков галактик.

Авторы благодарны И. Д. Караченцеву за внимание к работе и С. Л. Парновскому за стимулирующие дискуссии.

1. Караченцев И. Д., Караченцева В. Е., Кудря Ю. Н., Парновский С. Л. Коллективные движения галактик из каталога FGC на масштабах 100 Мпк // *Астрон. журн.*—2000.—77, № 3.—С. 175—187.
2. Караченцева В. Ю., Караченцев И. Д., Кудря Ю. М., Парновский С. Л. Позагалактичні дослідження на основі каталога плоских галактик // *Вісник Київ. ун-ту. Астрономія.*—1999.—36.—С. 6—13.
3. Караченцева В. Е., Караченцев И. Д., Кудря Ю. Н., Парновский С. Л. Общие свойства объектов каталога плоских галактик. Функция диаметров // *Письма в Астрон. журн.*—1997.—23, № 1.—С. 15—22.
4. Кудря Ю. Н., Караченцева В. Е., Караченцев И. Д., Парновский С. Л. Видимые величины и диаграмма Талли—Фишера для галактик каталога FGC // *Письма в Астрон. журн.*—1997.—23, № 9—10.—С. 728—733.
5. Парновский С. Л., Кудря Ю. Н., Караченцева В. Е., Караченцев И. Д. Коллективные движения плоских галактик на масштабах 100 Мпк в квадрупольном и октупольном приближениях // *Письма в Астрон. журн.*—2001.—27, № 12.—С. 1—11.
6. Dekel A., Eldar A., Kolatt T., et al. POTENT Reconstruction from Mark III Velocities // *Astrophys. J.*—1999.—522, N 1.—P. 1—38.
7. Karachentsev I. D. Thin edge-on galaxies as a tool for the investigation of large-scale streaming motions in the Universe // *Astron. J.*—1989.—97, N 6.—P. 1566—1575.
8. Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Kudrya Yu. N., et al. The revised Flat Galaxy Catalogue // *Bull. SAO.*—1999.—47.—P. 5—185.
9. Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Kudrya Yu. N., et al. A list of peculiar velocities of RFGC galaxies // *Bull. SAO.*—2000.—50.—P. 5—38.
10. Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Parnovsky S. L. Flat Galaxy Catalogue // *Astron. Nachr.*—1993.—314, N 3.—P. 97—222.
11. Tully R. B., Fisher J. R. A new method of determining distances to galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1977.—54.—P. 661—673.
12. Willick J. A., Courteau S., Faber S. M., et al. Homogeneous Velocity-Distance Data for Peculiar Velocity Analysis. III. The Mark III Catalog of Galaxy Peculiar Velocities // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1997.—109, N 1.—P. 333—391.

Поступила в редакцию 15.01.02