

УДК: 524.74:520.843.054

МНОГОЦВЕТНАЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ФОТОМЕТРИЯ
КОЛЬЦЕОБРАЗНЫХ ГАЛАКТИК

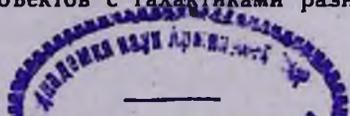
В. Л. АФАНАСЬЕВ, И. П. КОСТЮК

Поступила 13 января 1988

Принята к печати 1 мая 1988

Приводятся результаты многоцветных наблюдений галактик с внешней кольцеобразной структурой на сканирующем щелевом электрофотометре. Получены интегральные фотометрические характеристики в B , V , R цветах 12 кольцеобразных галактик. Проведено сравнение исследуемых галактик с галактиками разных морфологических типов и показано, что кольцеобразные галактики принадлежат к ранним морфологическим типам на хаббловской последовательности, но с более протяженным диском по сравнению с ранними системами без колец.

1. Введение. Кольцеобразные галактики — это системы с плоской составляющей, в которой усматривается изолированная от центральной области кольцеобразная деталь. Внешнюю кольцеобразную структуру в галактиках ранних морфологических типов отмечали Хаббл [1] и де Воклер [2] и, как правило, связывали ее с присутствием перемычки у галактики. Позднее Воронцов-Вельяминов [3], изучая различные морфологические типы галактик на картах Паломарского обзора неба (ПА), выделил чисто кольцевые галактики — галактики без видимой перемычки и с изолированной внешней кольцевой деталью. По ряду причин Воронцов-Вельяминов предложил рассматривать чисто кольцевые галактики как отдельную последовательность, параллельную нормальным и пересеченным галактикам в хаббловском «камертоне». Основная часть галактик с внешней кольцеобразной структурой имеет видимые фотографические звездные величины $m_{pg} > 13^m$, угловые размеры $\sim 1'$ и поэтому их морфологическая классификация по хаббловским типам на картах ПА весьма затруднительна. Таким образом, существует проблема классификации кольцеобразных галактик: принадлежат ли они к определенным морфологическим типам или располагаются вдоль всей спиральной последовательности. Решение этой проблемы связано с получением из наблюдений количественных характеристик кольцеобразных галактик, т. к. эти данные дают возможность провести сравнение изучаемых объектов с галактиками разных морфоло-



гических типов и показать, какое место они занимают на лаббловской последовательности.

Отбор кольцеобразных галактик производился на картах ПА — достаточно однородном материале для поисковых задач. Был составлен список галактик с внешней кольцеобразной структурой [4], из которого 116 объектов представляют собой довольно однородную морфологическую группу галактик с центральной областью и внешней кольцеобразной деталью, видимым образом на ПА, не связанной с внутренними частями. Ниже будут рассматриваться свойства галактик из этой группы.

Следует отметить, что кольцевыми галактиками в литературе часто называют пекулярные объекты, имеющие форму кольца и не имеющие центрального ядра, — кольцевые безъядерные галактики и галактики с нецентральной ядерной областью. Строение этих галактик удовлетворительно объясняется взаимными столкновениями галактик или галактики с облаком межгалактического газа. На наш взгляд, такие объекты и галактики с внешней кольцеобразной структурой не имеют генетического и морфологического единства. Поэтому в изучаемую выборку кольцеобразных галактик пекулярные кольцевые галактики не включены.

Если имеется необходимость в получении интегральных фотометрических характеристик небольшой выборки равномерно распределенных по небесной сфере галактик с относительно малыми угловыми размерами и видимыми звездными величинами в интервале $12^m < m_{pg} < 15.^m7$, то многоцветные фотоэлектрические наблюдения имеют ряд преимуществ перед фотографическими. Это происходит из-за относительной легкости осуществления многоцветных наблюдений в стандартной фотометрической системе, сокращения затрат наблюдательного времени, простоты фотометрической привязки, возможности получения более высоких фотометрических точностей, большего диапазона линейности системы регистрации. Обычно используются два варианта фотоэлектрических наблюдений галактик: с круглыми центрированными диафрагмами различных диаметров и со щелью, сканирующей изображение галактики вдоль, определенного направления. Наблюдения со сканирующей щелью по сравнению с центрированными диафрагмами позволяют легко изменить размер фотометрируемой области, получить необходимое угловое разрешение и относительно легко избавиться от звезд фона. В работах [5, 6] описывается методика и приводятся результаты одноцветных наблюдений спиральных галактик со сканирующим электрофотометром. Краткое сообщение о результатах наблюдений на сканирующем электрофотометре САО АН СССР выборки кольцеобразных галактик было дано в [7]. В настоящей работе на примере тех же галактик описывается методика многоцветных наблюдений на сканирующем электрофотометре, обработка их результатов и более подробно приведены сами результаты.

2. *Наблюдения.* Наблюдения проводились в *B, V, R* стандартных цветах на 6-метровом телескопе САО АН СССР БТА, 2,6-метровом телескопе Бюраканской астрофизической обсерватории ЗТА и 2-метровом телескопе Болгарской АН. Список исследуемых галактик приведен в табл. 1.

Таблица 1

СПИСОК КОЛЬЦЕОБРАЗНЫХ ГАЛАКТИК.
ИССЛЕДОВАННЫХ СО СКАНИРУЮЩИМ ЭЛЕКТРОФОТОМЕТРОМ

| № по [4] | Тип | NGC, IC МКГ | Телескоп | D'' | $m_{Z\omega}$ | ϵ сжатие | Щель | θ° | Формат сканирования |
|----------|-----|-------------|----------|-------|---------------|-------------------|--------------------|----------------|---------------------|
| 5 | RSB | NGC 108 | 2-м НАО | 114 | $13^m 3$ | 1.00 | 4.8×50.7 | 0 | 114.0 |
| 15 | RS | 0—5—33 | " | 60 | 14.0 | 1.00 | " | 0 | " |
| 26 | RSB | 10—10—21 | БТА | 42 | 14.9 | 0.75 | 2.6×68.8 | 8 | 110.5 |
| 94 | RS | NGC 5613 | ЗТА | 60 | 15.5 | 0.78 | 4.1×101.5 | 7 | 110.8 |
| 98 | RS | 4—34—49 | " | 54 | 15.2 | 1.00 | " | 0 | " |
| 100 | RS | NGC 5790 | " | 60 | 15.1 | 0.74 | " | 18 | " |
| 107 | RS | NGC 6028 | " | 66 | 14.8 | 0.85 | " | 29 | " |
| 109 | RS | 8—29—41 | " | 50 | 14.3 | 0.71 | " | 0 | " |
| 115 | RS | 10—25—45 | " | 37 | 15.4 | 0.73 | 2.0×51.0 | 88 | 65.6 |
| 119 | RS | 5—42—15 | " | 66 | 15.1 | 0.68 | 4.1×101.5 | 3 | 110.8 |
| 122 | RSB | NGC 6552 | " | 48 | 14.6 | 0.80 | " | 87 | " |
| 134 | RS | IC 5285 | " | 90 | 14.4 | 0.71 | " | 69 | " |

Данные в 1, 2, 5, 7 столбцах взяты из [4], D — угловой размер галактики вдоль ее большой оси, измеренный на синих картах ПА, $m_{Z\omega}$ — видимая фотографическая звездная величина из [8], ϵ — видимое сжатие галактики, измеренное на синих картах ПА, θ — угол между направлением сканирования и большой осью галактики.

Для описания галактики использовалась двухкомпонентная модель Фридмана—Морозова [9]. Галактика состоит из двух подсистем, плотности в каждой из которых являются только функцией расстояния от центра r : сферической составляющей с объемной плотностью $\rho(r)$ и плоского бесконечно тонкого диска с поверхностной плотностью $\sigma(r)$. Отношение массы к светимости в каждой составляющей считается постоянным и тогда величинам $\rho(r)$ и $\sigma(r)$ ставится в соответствие яркость единицы объема сфероида $I_b(r)$ и поверхностная яркость диска $I_d(r)$. Введем функцию полосы $\varphi(s)$ — спроектированное на некоторую прямую линию в картинной плоскости распределение яркости и проинтегрированное вдоль нее, где s — кратчайшее расстояние от центра галактики до этой линии. В общем случае, когда направление сканирования составляет угол θ с большой осью

галактики и картинная плоскость наклонена к плоскости симметрии галактики на угол i , имеем следующее выражение для одномерной яркости:

$$\varphi(s) = \varphi_b(s) + \varphi_d(s) = 2\pi \int_0^R I_b(r) r dr + \operatorname{tg} \gamma \int_0^R \frac{I_d(r) r dr}{\sqrt{r^2 - s^2 \operatorname{tg}^2 \gamma}}$$

где r — радиус галактики, R — половинный размер галактики вдоль большой оси, $\operatorname{tg}^2 \gamma = (1 - \sin^2 \theta \cdot \sin^2 i)$. При малых значениях r можно считать, что основной вклад в интегральную яркость дает сфероидаальная составляющая, а при больших значениях r можно учитывать только плоскую составляющую. Интегральные и средние фотометрические характеристики галактик можно получить из наблюдаемых одномерных распределений яркости $\varphi(s)$.

В сканирующем электрофотометре предусмотрена возможность изменения размеров движущейся щели и формата сканирования. Один цикл сканирования длился 27 с, затем щель возвращалась в исходное положение и начинался следующий скан. Результаты сканирования суммировались в памяти 800-канального анализатора импульсов фирмы «Nokia». Вся память разбивалась на четыре равные части. Стандартная звезда с известными звездными величинами наблюдалась до и после сканирования галактики и эти наблюдения записывались в первую и третью части памяти анализатора. Таким образом контролировались условия наблюдений. Во вторую часть памяти записывалось определенное количество сканов галактики, которое в зависимости от яркости объекта и используемого телескопа изменялось от 20 до 100. Такая процедура проделывалась в каждом цвете. Четвертая часть памяти использовалась для контроля отсчетов люминофора электрофотометра. Данные, накопленные в полной памяти анализатора, записывались на магнитную ленту кассетного магнитофона. Фон сумеречного неба, как источник равномерной засветки («плоское поле»), записывался во всех цветах каждую наблюдаемую ночь. Редукция наблюдательных данных происходила на ЭВМ СМ-4 с помощью математического обеспечения, в основу которого было положено математическое обеспечение, разработанное ранее одним из авторов [6] для случая одноцветных наблюдений со сканирующим электрофотометром. Ниже приводится описание этапов обработки результатов наблюдений.

3. Учет неоднородности чувствительности по каналам. При сканировании щелью равномерной засветки получаем кривую чувствительности по каналам, форму которой необходимо знать с точностью до нескольких процентов. Сумеречное небо записывалось подряд в две разные части памяти анализатора по одному скану. На каждую запись из-за светящего неба накладывался тренд, одинаковый для обеих записей. Зная интервал вре-

мени между ними, можно определить тренд и исправить за него запись равномерной засветки. Затем эти данные нормировались, сглаживались с окном 10 или 20 каналов и усреднялись по тем ночам, когда в методике наблюдений не происходило каких-либо изменений. Для равномерных засветок создана своя библиотека файлов, из которой может быть вызвана необходимая нормированная сглаженная кривая. Наблюдения стандартной звезды и галактики поканально делились на нее. По десять каналов с каждого края скана при дальнейшей обработке не учитывались из-за неуверенных редуций.

4. *Сглаживание одномерных профилей яркости.* Две записи звезды (до и после наблюдения галактики) сводились в одну. После вычитания фона неба получали профиль одномерной яркости звезды, звездная величина которой известна. Таким образом получали аппаратную функцию системы регистрации и фотометрическую привязку. Восстановление данных наблюдений галактики методом регуляризации [10] описано в [6] и применялось в данной работе. При этом происходит сглаживание одномерного распределения яркости. Предусмотрена возможность сглаживания фильтром с управляемым коэффициентом усиления, который дает хорошие результаты при малых отношениях сигнала к шуму. Если видимое сжатие галактики отличается от единицы, то можно перейти от одномерного распределения яркости в картинной плоскости к одномерному распределению в плоскости симметрии галактики.

5. *Фотометрические редуции.* Стандартная звезда всегда находилась рядом с исследуемой галактикой (на угловом расстоянии не более $20'$). Звездные величины стандартных звезд любезно предоставлены нам Копачкой, Белоконь, Неизвестным (неопубликованные данные). Переход от инструментальных звездных величин к системе Джонсона осуществлялся по схеме, приведенной в [11], после специально проведенных наблюдений звездных скоплений с известными стандартными звездными величинами на двух разных зенитных расстояниях. Библиотека коэффициентов перехода хранится в памяти ЭВМ. Фотометрические редуции одномерных распределений яркости проводились поканально в каждом цвете.

6. *Переход от одномерного распределения яркости в картинной плоскости к распределению яркости по радиусу галактики, т. е. решение интегрального уравнения, приведенного выше.* По известной из наблюдений функции полосы $\varphi(s)$ находим распределение яркости вдоль радиуса галактики в ее плоскости $I(r)$. Уравнение решается численно в каждом цвете отдельно, как это делалось в [6].

7. *Результаты наблюдений.* Из одномерных редуцированных распределений яркости в B, V, R лучах можно оценить ряд фотометрических пара-

метров исследуемых галактик: вклад светимости балджа в общую светимость галактики, абсолютные светимости балджа и всей галактики, показатели цвета галактики, ее балджа и кольцевой детали. Такие фотометрические характеристики для 12 кольцеобразных галактик приведены в табл. 2. Две последние строки в таблице—соответственно среднее значение величины, приведенной в столбике, и ее среднее квадратичное отклонение. Постоянная Хаббла принималась равной 75 км/с Мпк . Ошибки измерений звездных величин составляют $\sim 0^m.1$ и показателей цвета соответственно $\sim 0^m.1 \pm 0^m.2$. Звездные величины и показатели цвета исправлены за поглощение света в Галактике [12], красное смещение [13], внутреннее поглощение в галактиках для морфологического типа $S0/a$ ($T = 0$) [14] и отнесены к изофоте с $\mu_B \simeq 25$. Отношения угловых размеров балджа и галактики вдоль большой оси галактики d_b/D оценены на синих картах ПА, отношение светимости балджа к светимости диска в галактике γ приведено для B -лучей.

Среднее значение интегральной абсолютной звездной величины выборки кольцеобразных галактик $M_B = -20^m.0$. В работе [15] на примере спиральных галактик типов $Sa-Sc$ показано, что зависимости линейного диаметра галактики до изофоты $\mu_B = 25$ от ее абсолютной звездной величины M_B для различных морфологических типов не отличаются. Если на такую зависимость нанести данные о кольцеобразных галактиках, то получим, что при тех же абсолютных звездных величинах исследуемые галактики имеют большие линейные размеры в среднем в 1.5 раза. Такой же вывод получен при статистическом сравнении абсолютных звездных величин, линейных размеров, средних поверхностных яркостей кольцеобразных галактик с двойными и изолированными [16]. Получено, что кольцеобразные галактики имеют более слабые средние поверхностные яркости относительно галактик без колец за счет больших своих линейных размеров. Среднее значение отношения угловых размеров балджа и всей галактики (шестая колонка табл. 2) равно 0.22 — балдж занимает небольшую часть всей галактики, т. е. кольцеобразные галактики имеют относительно более протяженный диск по сравнению с галактиками без колец.

На рис. 1 наряду с двухцветной диаграммой $(B-V)_0 - (V-R)_0$ для звезд главной последовательности (сплошная линия) крестиками отмечены положения галактик различных морфологических типов из работы [13]. Средние значения показателей цвета для кольцеобразных галактик и их балджей отмечены на рисунке соответственно точкой и кружком, отрезками указаны средние квадратичные отклонения. Кольцеобразные галактики на этой диаграмме расположены вблизи ранних морфологических типов.

Зависимость логарифма отношения светимости балджа к светимости диска $\lg \gamma$ от морфологического типа из работы [17] показана на рис. 2.

Таблица 2

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОЛЬЦЕОБРАЗНЫХ ГАЛАКТИК

| № по [4] | Вся галактика | | | | d_s/D | D (кпк) | Балдж галактики | | | | $\lg \gamma$ |
|----------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------|-----------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------|
| | B_0 | $(B-V)_0$ | $(V-R)_0$ | $(-M_B)$ | | | B_0 | $(B-V)_0$ | $(V-R)_0$ | $-M_V$ | |
| 5 | 13 ^m 19 | 0 ^m 96 | 0 ^m 83 | 20 ^m 9 | 0.22 | 36.2 | 14 ^m 2 | 1 ^m 1 | 0 ^m 9 | 20 ^m 9 | -0.22 |
| 15 | 14.31 | 0.97 | 0.60 | 19.9 | 0.34 | 20.0 | 14.6 | 0.9 | 0.7 | 20.5 | 0.45 |
| 26 | 14.98 | 1.07 | — | 19.0 | 0.32 | 12.7 | 15.7 | 1.0 | — | 19.3 | -0.01 |
| 94 | 15.73 | 0.94 | 0.61 | 19.6 | 0.15 | 34.3 | 17.0 | 0.9 | 0.8 | 19.3 | -0.34 |
| 98 | 14.97 | 0.66 | — | 20.7 | 0.24 | 34.9 | 16.3 | 0.6 | — | 20.0 | -0.38 |
| 100 | 15.02 | 0.72 | 1.02 | 21.3 | 0.17 | 53.2 | 16.3 | 0.8 | 1.1 | 20.9 | -0.37 |
| 107 | 14.74 | 0.95 | 0.67 | 19.1 | 0.24 | 19.0 | 15.2 | 0.8 | 0.8 | 19.5 | 0.22 |
| 109 | 14.56 | 1.17 | 0.59 | 20.0 | 0.19 | 36.0 | 15.3 | 1.0 | 0.7 | 20.3 | -0.01 |
| 115 | 15.95 | 0.71 | 1.21 | 19.3 | 0.24 | 23.0 | 17.1 | 1.1 | 0.7 | 19.3 | -0.25 |
| 119 | 15.07 | 0.88 | 0.62 | 20.1 | 0.19 | 34.5 | 15.8 | 1.0 | 0.7 | 20.4 | 0.05 |
| 122 | 14.28 | 0.54 | 1.01 | 20.9 | 0.26 | 25.2 | — | — | — | — | — |
| 134 | 14.32 | 1.11 | 0.44 | 20.3 | 0.15 | 37.4 | 15.2 | 1.2 | 0.6 | 20.6 | -0.13 |
| Среднее | | 0.89 | 0.76 | 20.1 | 0.22 | 30.5 | | 1.0 | 0.8 | 20.4 | -0.09 |
| σ | | 0.19 | 0.25 | 0.7 | 0.06 | 10.9 | | 0.15 | 0.15 | 0.7 | 0.26 |

В [18] приводится такая же зависимость $\lg \gamma$ от морфологического типа, полученная на большей выборке галактик, которая не отличается от при-

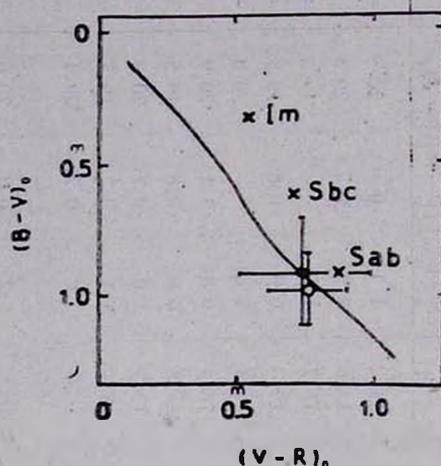


Рис. 1. Двухцветная $(B-V)_0 - (V-R)_0$ диаграмма для звезд главной последовательности (сплошная линия), галактик различных морфологических типов (крестики). Точкой и кружком отмечены соответственно средние значения показателей цвета для кольцеобразных галактик и их балджей со своими стандартными отклонениями.

веденной на рис. 2. Пунктирными линиями отмечены границы значений $\lg \gamma$ для выборки кольцеобразных галактик (данные из табл. 2). Среднее значение $\lg \gamma = -0.09 \pm 0.08$. Кольцеобразные галактики концентрируются к ранним морфологическим типам.

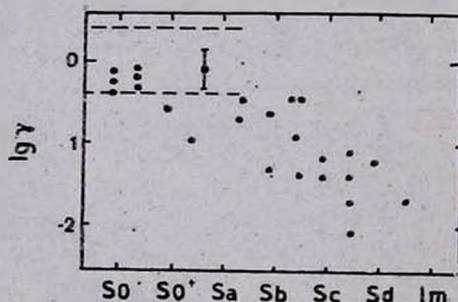


Рис. 2. Зависимость логарифма отношения светимости балджа к светимости диска $\lg \gamma$ от морфологического типа галактики из работы [17]. Показаны границы значений $\lg \gamma$ (пунктирные линии) и его среднее значение для кольцеобразных галактик.

Абсолютная светимость балджа в V цвете связана с морфологическим типом галактики, как это показано на рис. 3, взятом из работы [18].

Значения светимостей балджей кольцеобразных галактик попадают между пунктирными линиями; показана средняя величина светимостей и ее среднее квадратичное отклонение. Рис. 3, так же, как и рис. 2 и 1, показывает тенденцию фотометрических параметров кольцеобразных галактик располагаться около соответствующих параметров галактик ранних морфологических типов.

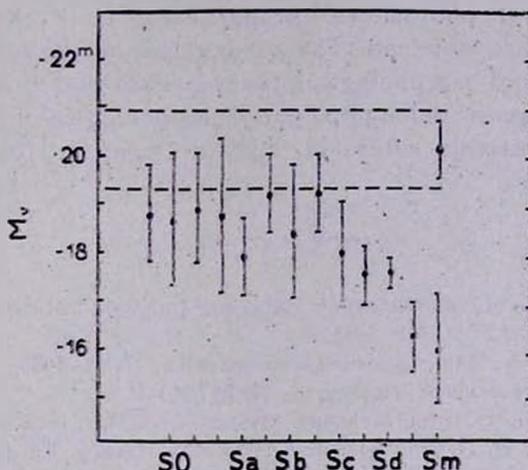


Рис. 3. Зависимость абсолютной светимости балджа галактики M_V от морфологического типа из [18]. Указаны границы значений M_V для кольцеобразных галактик (пунктирные линии), средняя величина этих значений и ее среднее квадратичное отклонение.

По результатам исследования кольцеобразных галактик из списка [4] со сканирующим электрофотометром и сравнения их фотометрических характеристик с данными для галактик различных морфологических типов, мы делаем вывод о принадлежности изучаемых галактик к ранним типам на хаббловской последовательности с относительно более протяженным диском по сравнению с ранними системами без колец и, следовательно, более низкими средними поверхностными яркостями.

Выражаем искреннюю признательность дирекции Бюраканской астрофизической обсерватории и дирекции Национальной астрономической обсерватории Болгарии АН за возможность наблюдений на 2,6-метровом телескопе ЗТА и 2-метровом телескопе, а также Е. Н. Копацкой, Е. Т. Белоконов, С. И. Неизвестному за предоставление неопубликованных данных наблюдений звезд сравнения.

Специальная астрофизическая
обсерватория АН СССР

MULTICOLOR PHOTOELECTRIC PHOTOMETRY OF RINGLIKE GALAXIES

V. L. AFANASYEV, I P. KOSTUYK

The results of multicolor observations of galaxies with an outer ringlike structure with the scanning strip photoelectric photometer are presented. Integral photometric properties in *B*, *V*, *R* colours for 12 ringlike galaxies are obtained. The comparison of studied galaxies with galaxies of different morphological types is made and it has been shown that ringlike galaxies belong to early morphological types on Hubble sequence with relatively extensive disk as compared to the early systems without rings.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Sandage, The Hubble Atlas of Galaxies, Carnegie Inst. of Washington, Washington, D. C., Publ. 618, 1961.
2. G. de Vaucouleurs, Mem. Observ. Commonwealth, No. 3, 1956.
3. Б. А. Воронцов-Вельяминов, Астрон. ж., 37, 381, 1960.
4. И. П. Костюк, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв. АН СССР, вып. 13, 45, 1975.
5. В. Л. Афанасьев, А. А. Пимонов, В. Ю. Тербиж, Сообщ. Спец. астрофиз. обсерв. АН СССР, вып. 33, 5, 1981.
6. В. Л. Афанасьев, Канд. диссертация, Нижний Архыз, 1981.
7. В. Л. Афанасьев, И. П. Костюк, Астрон. циркуляр, № 1316, 1, 1984.
8. F. Zwicky, E. Herzog, P. Wild, M. Karowitch, C. T. Kowal, Catalogue of Galaxies and Clusters of Galaxies, Univ. Texas Press, Pasadena, 1961.
9. В. Л. Поляченко, В. С. Сынах, А. М. Фридман, Астрон. ж., 48, 1174, 1971.
10. А. В. Гончарский, А. М. Черепашук, А. Т. Ягола, Численные методы решения обратных задач астрофизики, Наука, М., 1978.
11. Х. Харди, Методы астрономии, Мир, М., 1967, стр. 157.
12. A. Sandage, Astrophys. J., 183, 711, 1973.
13. G. D. Coleman, D. W. Weedman, C. C. Wu, Astrophys. J. Suppl. Ser., 43, 393, 1980.
14. G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, Reference Catalogue of Bright Galaxies, Univ. Texas Press, Austin, 1964.
15. V. Rubin, The Comparative HI Content of Normal Galaxies, A Green Bank Workshop, 1982, p. 42.
16. И. П. Костюк, Канд. диссертация, Нижний Архыз, 1985.
17. M. Yoshizawa, K. Wakamatsu, Astron. and Astrophys., 44, 363, 1975.
18. K. Kodaira, M. Watanabe, S. Okamura, Astrophys. J. Suppl. Ser., 62, 703, 1986.