

УДК 524.7:520.828

ИЗОДЕНСИТОМЕТРИЯ ИЗБРАННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ГАЛАКТИК. I

Ю. П. КОРОВЯКОВСКИЙ

Поступила 7 июля 1983

Принята к печати 5 февраля 1984

Приведены результаты цифровой обработки крупномасштабных снимков взаимодействующих галактик, полученных в главном фокусе 6-м телескопа САО АН СССР. Разработанные алгоритмы обработки обеспечили ослабление высокочастотного шума эмульсии и повышение углового разрешения снимков. Результаты обработки исследованных объектов представлены в виде двумерных изоденситометрических карт, содержащих количественную информацию о распределении яркости в объектах. Анализ улучшенных снимков взаимодействующих галактик позволил уточнить их классификацию, выполненную ранее Б. А. Воронцовым-Вельяминовым.

1. *Введение.* Для понимания физической природы таких интересных и неординарных объектов, которыми являются взаимодействующие галактики, важное значение имеет метод морфологического исследования их изображений. Этот метод является основой для отбора и классификации по какому-либо признаку различных типов звездных систем (двойных галактик, компактных галактик и т. д.). В настоящее время имеется широко известный атлас взаимодействующих галактик Воронцова-Вельяминова, составленный на основе изучения Паломарского обзора [1, 2], и атлас Арпа, содержащий крупномасштабные фотографии галактик, полученные в основном на 5-м телескопе обсерватории Маунт-Паломар [3]. Лишь относительно небольшая доля изображений галактик из атласа Воронцова-Вельяминова (в основном из его первой части) вошла в атлас Арпа. Основная же выборка (около 900 объектов) в атласе Воронцова-Вельяминова сделана по мелкокомасштабным Паломарским картам, и это обстоятельство существенно осложнило их классификацию, особенно для компактных групп галактик (гнезд, цепочек, тесных пар и т. д.).

При получении изображений в атласе Арпа типичные экспозиции составляли промежутки времени, равные ~ 30 мин, так что центральные, наиболее яркие области взаимодействующих галактик сильно переэкспонированы, что в условиях ограниченной ширины рабочей области фотобума-

ги, на которую произведены отпечатки изображений, привело почти к полной потере информации в этих важных для понимания физической природы областях.

Эти обстоятельства и послужили причиной постановки на 6-м телескопе САО АН СССР наблюдательной программы, инициированной Б. А. Воронцовым-Вельяминовым, по получению крупномасштабных фотографий избранных объектов, в основном малого углового размера, из атласа Воронцова-Вельяминова.

При обработке и интерпретации полученных результатов использовались быстродействующие и высокоточные средства оцифровки изображений, созданные под руководством автора в САО АН СССР [4]. Для очистки изображений от шумов фотоэмульсии, улучшения углового разрешения и получения количественных карт в виде изоденс были разработаны соответствующие алгоритмы, реализованные на ЭВМ М 4030 и ЕС-1035 [5]. Всего было снято, оцифровано, записано в банк данных и обработано около сотни изображений различных взаимодействующих галактик.

В настоящей работе прямые фотографии и результаты обработки приведены для первой части исследованных галактик и на основе этого материала уточнена их морфология и классификация.

2. Наблюдательный материал. Для получения прямых снимков выбирались ночи с хорошими астроклиматическими условиями; основной объем наблюдательного материала получен при качестве изображения не хуже чем $2''$ — $2.''5$ (примерно 80% общего числа исследованных галактик). При таком качестве изображения размер безабберационного поля первичного фокуса БТА без корректора составляет $5'$ — $6'$, а проникаемость БТА без корректора возрастает на 1^m в В-системе [6]. Поскольку большинство объектов программы были компактны, практически все снимки были получены без использования линзового корректора поля БТА, что позволило за единицу времени получать большее количество информации. Типичная экспозиция для эмульсии 103а-О выбиралась равной 15^m , что обеспечивало проникаемость снимков по звездам не хуже 22^m — 23^m (в зависимости от качества изображения) [7]. Калибровка снимков проводилась на спектросенситометре ИСП-73, а обработка их осуществлялась в проявителе МWP-2 в стандартных условиях. Хорошему качеству снимков способствовало точное слежение за положением фокальной плоскости телескопа на основе измерений температурного поля окружающей среды, конструкций и зеркала телескопа [8].

Для обработки снимков и спектров небесных объектов в САО был создан фотометрический комплекс, в состав которого входит автоматический микроденситометр АМД-1, управляемый ЭВМ, процессор вывода с фотозаписывающим аппаратом, графопостроителем, универсальным графич-

ческим дисплеем и обрабатывающий процессор СМ-4. Высокая позиционная ($\pm 5 \mu\text{m}$) и фотометрическая (диапазон измеряемых оптических плотностей $0-4 D$, линейность не хуже $1-1.5\%$) точности обеспечили высокое качество съема и оцифровки исходного материала. Число отсчетов на каждый объект было выбрано равным 512×512 , шаг сканирования выбирался из диапазона величин $15-40 \mu\text{m}$ в зависимости от угловых размеров исследуемого объекта. При таком числе отсчетов время, затраченное на оцифровку изображения на АМД, цифровую фильтрацию двумя фильтрами на ЭВМ ЕС-1035 и построение изоденситометрических карт, составляло примерно 3 часа. Специально разработанное математическое обеспечение [9] обеспечивало сканирование исследуемого объекта по заданному закону, запись паспорта объекта и оцифрованной информации на магнитную ленту, перекодировку и запись отдельных изображений в цифровом виде в банк данных, который был организован на магнитной ленте ЭВМ ЕС-1035 для дальнейшей обработки и последующего длительного хранения атласа в цифровой форме.

Для выделения слабосветящихся оболочек и перемычек в исследуемых объектах оцифрованное изображение подвергалось фильтрации с помощью рассчитанного оптимального фильтра низкой частоты (далее ОФНЧ), частотная характеристика которого имеет вид:

$$\text{ОФНЧ}(\omega, \sigma) = \frac{1}{1 + \frac{S_N(\omega, \sigma)}{S_p(\omega, \sigma)}}, \quad (1)$$

где S_N и S_p — спектральная плотность мощности шума фотоэмульсии и спектральная плотность мощности сигнала соответственно. Оценки S_N и S_p были получены с помощью специально разработанных программ [9]. На рис. 1 приведен радиальный разрез частотной характеристики используемого для сглаживания шумов оптимального фильтра низкой частоты. Применение подобного фильтра обеспечивает уверенное выявление сигнала при ОСШ порядка единицы (изоденса, отличающаяся от фона неба всего на $0.05 D$, уверенно выявляется при σ_D фона $\approx 0.10-0.15 D$). Угловой размер объектов на отфильтрованных снимках примерно в два—два с половиной раза больше, чем при глазомерных оценках.

Для улучшения углового разрешения снимков, устранения атмосферного размазывания изображений была использована методика [5], которая хорошо себя зарекомендовала при выявлении кратных ядер [10] и выбросов в галактиках. На рис. 2 приведены радиальный разрез реставрирующего винеровского фильтра, который использовался в данной работе для улучшения углового разрешения исходных снимков (далее РВФ). Применение этого метода в благоприятных условиях обеспечивает увеличение исходного разрешения примерно в два раза.

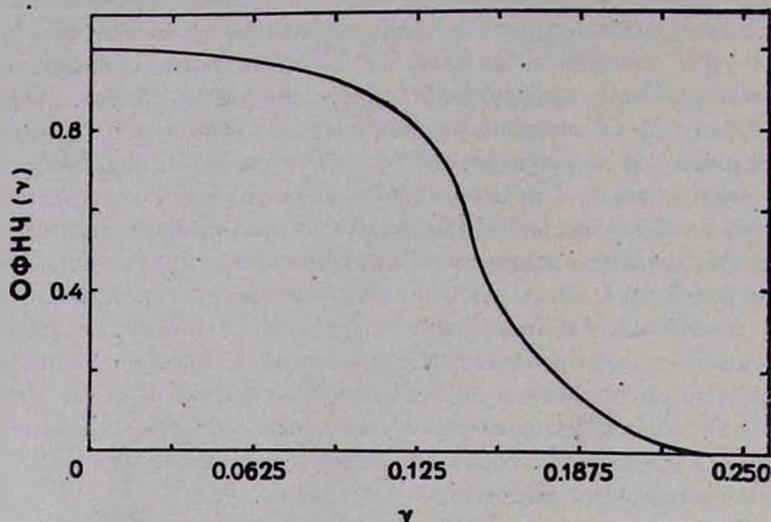


Рис. 1. Радиальный разрез частотной характеристики оптимального фильтра низкой частоты, используемого для ослабления высокочастотного шума эмульсии. По оси абсцисс отложена безразмерная частота $\nu = \sqrt{\omega^2 + \sigma^2} / f_H$; f_H — частота Нейквиста, $f_H = 1/2T$, T — шаг дискретизации изображения.

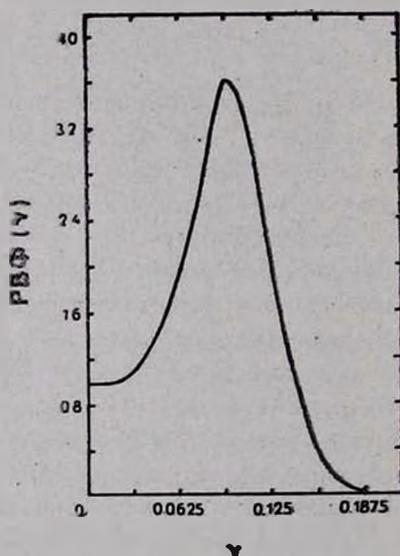


Рис. 2. Радиальный разрез частотной характеристики оптимального Винеровского фильтра, используемого для улучшения углового разрешения исходных снимков.

После процедуры фильтрации обработанное изображение выводилось на разработанное в САО фотозаписывающее устройство фотометрического комплекса в виде карт изоденс с заданным шагом между уровнями, так что окончательные результаты содержат не только качественную, но и количественную информацию о распределении относительной яркости объекта. Фильтрация изображений проводилась в $D(x, y)$ плоскости согласно рекомендациям [11].

3. *Результаты.* Сведения об условиях съемки, сканирования и обработки описанных в этой статье объектов помещены в табл. 1. В ней приведены: название объекта по атласу Воронцова-Вельяминова или по атласу Арпа (с добавлением буквы А), качество изображения в момент съемки, тип эмульсии (снимки получены без фильтра), экспозиция, оптическая плотность фона неба, шаг по D между соседними изоуровнями при построении карт изображений объектов, обработанных с помощью ОФНЧ и РВФ, соответствующий номер рисунка. При построении изоденс мы использовали трехуровневую запись (черное, серое и белое).

Таблица 1

№	VV, Арп	Качество изображения (угл. сек)	Эмульсия	Экспоз. (мин)	D фона неба	Шаг сканир. μ т	Шаг между изоденсами ОФНЧ ΔD	Шаг между изоденсами РВФ ΔD	Рисунок 3 (номер ряда)
1	596	1.7	II аО	20	1.30	20	0.05	0.15	1
2	528	~ 4	103 аО	15	0.76	25	0.10	0.15	2
3	552	~ 4	103 аО	15	0.38	20	0.05	0.10	3
4	641	~ 3.5	103 аО	15	0.30	20	0.05	0.10	4
5	444	~ 5	103 аО	15	0.30	35	0.05	0.10	5
6	261	1.5	103 аО.	14	0.60	20	0.05	0.10	6
7	632	2	II аО	20	1.05	25	0.10	0.15	7
8	A90	1.5	ZU-2	5	0.90	35	0.05	0.10	8

Ниже дано краткое описание исследованных в этой статье объектов, прямые фотографии и карты изоденс которых приведены на соответствующих рисунках.

IV 596. Классифицирован Воронцовым-Вельяминовым как гнездо в «тумане». При большем разрешении на снимке четко проявились две спирали, начинающиеся из двух уярчений, компактное ядро и продолговатый сгусток справа—внизу на снимке. Вероятно, это либо обычная спиральная галактика с кратным ядром, либо две взаимодействующие спиральные галактики; в этом случае ядром второй галактики является продолговатый

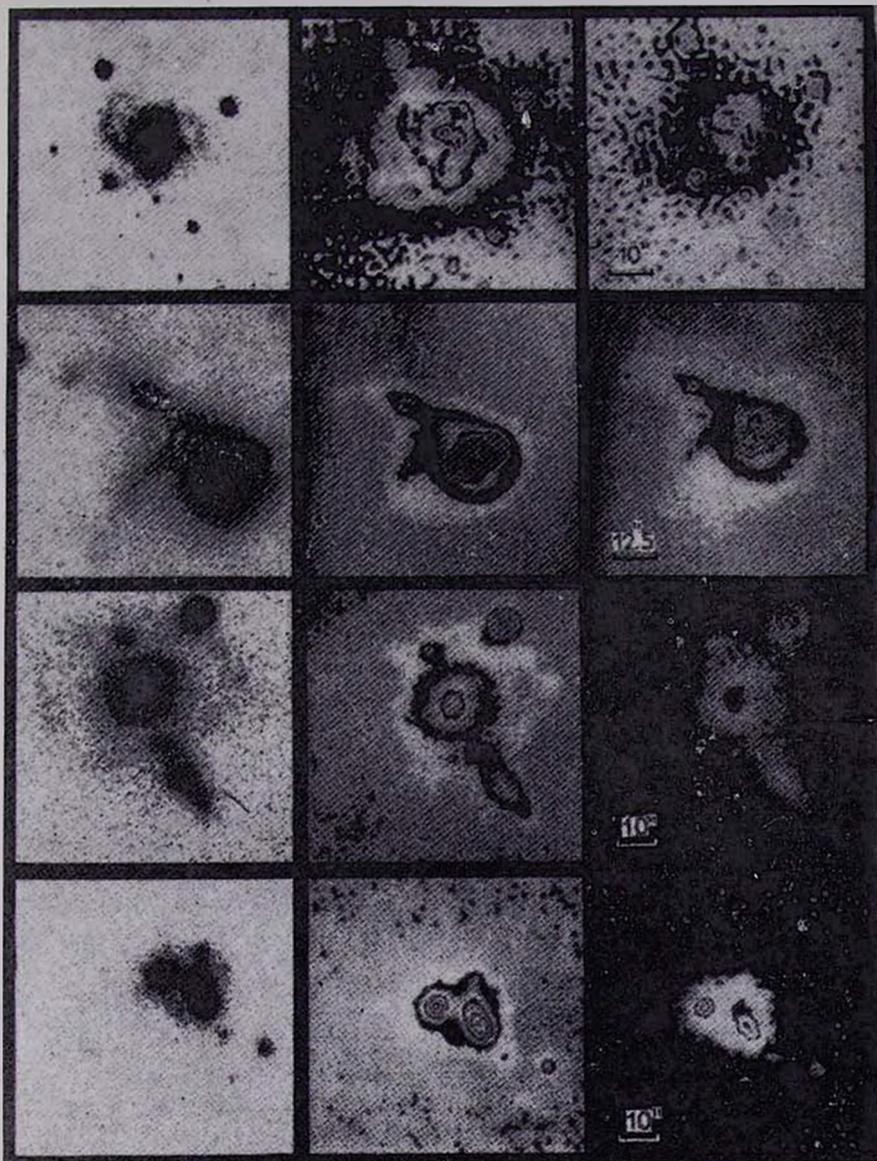
сгусток. Лучевая скорость системы измерена [12] и составляет 2911 км/с. При $H = 75$ км/с Мпс расстояние до системы равно ~ 38.8 Мпс. При обработке ОФНЧ уверенно выявляется слабосветящаяся оболочка, отличающаяся от фона неба всего на $0.05 D$ и имеющая угловые размеры $46'' \times 54''$ (8.6×10.2 кпс), что соответствует размерам нормальной средней галактики.

IV 528. Классифицирован Воронцовым-Вельяминовым как гнездо с числом членов не менее трех. С большой степенью вероятности правый компактный объект является яркой звездой поля (градиент яркости у него примерно в 1.5 раза круче, чем у левого компонента, который, вероятно, является ядром галактики). На спектре, при съемке которого щель спектрографа проходила через верхний левый «спутник» и предполагаемое ядро, в ядерной части присутствует мощная линия H_{α} . У спутника линия H_{α} существенно слабее. В ядре присутствуют также линии [N II] и [S II], так что левый компактный объект не может быть звездой поля. Грубая оценка величины лучевой скорости составляет ~ 4000 км/с. Оценка расстояния до системы дает 53 Мпс, а линейные размеры, определенные по самой слабой изоденсе, составляют $\sim 46''$ или 10—12 кпс. У главной галактики хорошо заметна спиральная структура. Спутник, как показывает изучение спектра, вероятно, физически связан с главной галактикой, так что более правильно классифицировать эту систему как тип M 51.

IV 552. Классифицирован [2] как «голубое гнездо», состоящее из 3—4 галактик. На крупномасштабном снимке хорошо заметны две галактики — меньшая (на рис. внизу), видимая с ребра, и большая — спиральная. Два объекта сверху являются звездами поля. Симметричность самых внешних изоденс, отсутствие усиления одной из спиралей у большей галактики, свидетельствует, вероятно, об отсутствии в системе физического взаимодействия [13]. Вся система погружена в слабосветящуюся оболочку диаметром $\sim 80''$.

IV 641. По [2] «распадающееся гнездо» из 4—5 членов. Анализ результатов обработки изображения этой системы показал, что три из пяти членов являются звездами поля (ими образован треугольник в нижней части снимка). Два члена являются эллиптическими галактиками; правая, более вытянутая, имеет «отросток», левая — компактная, звездобразная. Обе галактики окружены слабосветящейся оболочкой, диаметр которой равен $70''$ — $80''$. На обработке РВФ хорошо заметна двойственность ядра правой галактики.

IV 444. Тип системы — M 51 по [2]. Лучевая скорость системы определена [14] и составляет величину $V_r = 1751$ км/с, размер галактики по самой слабой изоденсе составляет $149''$ или 26.6 кпс.



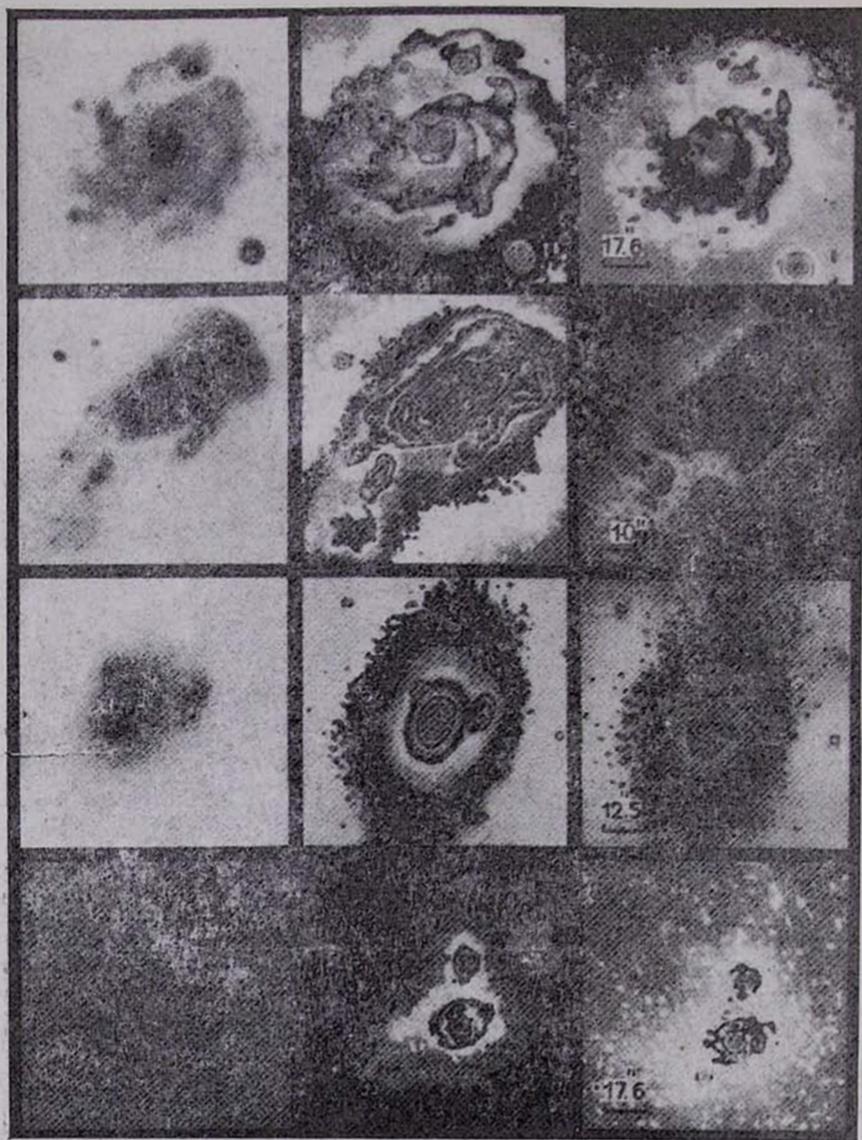


Рис. 3. Прямые фотографии и изоденситометрические карты избранных взаимодействующих галактик. Подробная информация об объектах содержится в табл. 1.

VV 261. Необработанное изображение, полученное автором на 6-м телескопе, помещено в [2] в виде отпечатков с последовательно уменьшающимися экспозициями. Обработка изображения этого интереснейшего объекта позволила выявить ряд дополнительных деталей. В ядерной области главного тела при обработке РВФ четко заметны четыре сгущения. Градиент яркости в этой области очень велик (ΔD составляет $2.7-2.9 D$ на $15''$). Морфология центральной части напоминает структуру известного объекта — джета в радиогалактике M 87, только в случае VV 261 мы, вероятно, наблюдаем двухсторонний выброс. Лучевая скорость этого объекта определялась многими авторами и равна ~ 2880 км/с. Наибольший размер системы, измеренный по наиболее слабой изоденсе, составляет около $100''$ (17 кпс).

V V 632. Согласно [2] это поздняя стадия фрагментации гнезда. Крупномасштабные снимки и их обработка обнаруживают эллиптическую галактику, на которую в левой части проектируется звезда поля; в правой части четко заметен карликовый спутник с проецирующейся на него ввиду слабой звездой поля. В спектре объекта отсутствуют эмиссионные линии [12] — типичная ситуация для эллиптической галактики. На обработке с помощью ОФНЧ уверенно выделена слабая изоденса, диаметр которой составляет $52'' \times 82''$, что примерно в два с половиной раза превышает глазомерные оценки углового диаметра этого объекта.

A 90. В атласе Арпа [3] центральная часть системы переэкспонирована. Нами сделана короткая экспозиция для выявления морфологии ядерных областей галактик. Одна из спиралей у большей галактики, как это хорошо заметно на снимке Арпа, усилена, что свидетельствует о приливном взаимодействии [13]. Лучевая скорость объекта $V_r = 2868$ км/с по [14], расстояние до системы равно ~ 38 Мпс. Расстояние между центрами компонентов составляет $26''$ (5 кпс), так что приливные возмущения в этой системе довольно мощные. Векторы угловых скоростей обеих галактик, как показывают расчеты [13] и анализ взаимного расположения внешних приливных спиралей, направлены, вероятно, в одну сторону. У нижней спирали большей галактики заметно уярчение; более слабое уярчение заметно также и у верхней спирали. Эти уярчения соединены с ядром слабой перемычкой. Звездообразный объект, расположенный ниже и левее нижней галактики, является дефектом на эмульсии. Ядерная область спутника показывает вытянутость в сторону главной галактики при обработке ОФНЧ. На снимке, обработанном РВФ, эта вытянутость переходит в перемычку с двумя уярчениями; для уточнения морфологии этой детали необходимо просканировать ядерные части с меньшим шагом дискретизации.

Автор выражает благодарность Б. А. Воронцову-Вельяминову за стимулирующее обсуждение проблемы получения и обработки крупномасштабных снимков избранных взаимодействующих галактик.

Специальная астрофизическая
обсерватория АН СССР

ISODENSITOMETRY OF THE SELECTED INTERACTING GALAXIES

YU. P. KOROVYAKOVSKI

The results of the digital processing of the large-scale photographs of interacting galaxies obtained in the prime focus of the 6-meter telescope are presented. The elaborated processing algorithms allowed to weaken the high-frequency emulsion noise and increase the angular resolution of the photographs. The processing results of the investigated objects are presented as two-dimensional maps, which contain quantitative information on the brightness distribution in the objects. An analysis of the improved photographs of the interacting galaxies allowed us to obtain more specific information on their classification, fulfilled earlier by B. A. Vorontsov-Vel'yaminov.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Воронцов-Вельяминов, Атлас взаимодействующих галактик, ч. 1, МГУ, М., 1959.
2. Б. А. Воронцов-Вельяминов, Атлас взаимодействующих галактик, ч. 2, *Astron. Astrophys. Suppl. ser.*, 28, No. 1, 1, 1977.
3. Н. Агр, Atlas of Peculiar Galaxies, *Astrophys. J. Suppl. ser.*, 14, No. 123, 1966.
4. О. С. Буренкова, В. М. Гурин, В. П. Горшков, А. А. Коровяковская, Ю. П. Коровяковский, А. Ф. Назаренко, И. И. Назаренко, В. С. Шергин, *Изв. САО*, (в печати).
5. А. А. Коровяковская, Ю. П. Коровяковский, *Астрон. ж.*, 59, 160, 1982.
6. И. М. Копылов, Ю. П. Коровяковский, М. Ф. Шабанов, Новая техника в астрономии, вып. 6, Наука, Ленинград, 1979.
7. Ю. П. Коровяковский, М. Ф. Шабанов, *ОПМ*, 5, 1978.
8. А. А. Бармин, В. М. Гурин, В. П. Ерохин, Ю. П. Коровяковский, М. Ф. Шабанов, Новая техника в астрономии, вып. 6, Наука, Ленинград, 1979.
9. Ю. П. Коровяковский, Отчет САО, № 3—ФК, 1980.
10. Ю. П. Коровяковский, А. Р. Петросян, К. А. Саакян, Э. Е. Хачикян, *Астрофизика*, 17, 231, 1981.
11. Б. Р. Хант, Применение цифровой обработки сигналов, Мир, М., 1980.
12. В. Л. Афанасьев, И. Д. Караченцев, В. П. Архипова, В. А. Досталь, В. Г. Метлов, *Astron. Astrophys.*, 91, 302, 1980.
13. А. А. Коровяковская, Ю. П. Коровяковский, *Изв. САО*, 16, 116, 1982.
14. G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, Reference Catalogue of Bright Galaxies, Austin, 1964.