

УДК 524.7-13-75/76-856-3:520-827

## СВОЙСТВА ДИСКОВ ГАЛАКТИК В ОПТИЧЕСКОМ И БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНАХ

© 2007 г. А. С. Гусев

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 10.04.2006 г.; после доработки 07.07.2006 г.

Проведен анализ параметров (радиальной шкалы, центральной поверхностной яркости и цвета) дисков 400 галактик различных типов. Значения шкалы падения яркости и центральной яркости дисков были получены для 9 галактик с использованием двумерной декомпозиции фотометрических изображений на балдж и диск в полосах *UBVRJHK*. Для 392 галактик использовались значения параметров дисков, взятые из литературных источников. Значения основных параметров диска — центральной поверхностной яркости  $\mu_{0,i}^0$  и линейной шкалы падения яркости  $h$  — лежат в достаточно узком диапазоне, плавно меняясь вдоль Хаббловской последовательности галактик. Для дисков галактик более ранних типов характерны более высокие значения центральной поверхностной яркости в *K*-полосе, центральной поверхностной плотности, отношения массы к светимости  $M/L(B)$  в центре, меньшие размеры (относительно диаметра галактики  $D_{25}$ ), более красные интегральные цвета и цвет в центре. Градиент цвета, нормированный на значение радиуса галактики, и “голубая” центральная поверхностная яркость  $\mu_{0,i}^0(B)$  диска не зависят от типа галактики. Значения радиальных шкал дисков, измеренных в различных фотометрических полосах, отличаются друг от друга меньше в галактиках ранних типов, чем в галактиках поздних типов. Наблюдается корреляция между центральной поверхностной яркостью дисков и общей светимостью галактики. Рассмотрено влияние пыли на фотометрические параметры дисков.

PACS numbers : 98.52.Nr, 98.62.Nr, 98.62.Js, 95.75.De, 98.62.Lv

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Знание фотометрических параметров дисковых компонент галактик является необходимым для изучения динамики и эволюции галактик, проблемы скрытой массы, распределения пыли в галактиках. В классическом случае тонкого экспоненциального диска ( $I = I_0 \exp(-r/h)$  или  $\mu = \mu_0 + 1.086(r/h)$ , где  $I(r) = -2.5 \lg \mu(r) + C$  — радиальный профиль яркости), для каждой фотометрической полосы диск описывается двумя параметрами: шкалой падения яркости  $h$  и центральной поверхностной яркостью  $\mu_0$ . Различные комбинации фотометрических параметров позволяют определить градиент цвета вдоль радиуса (зависящий от возраста и химического состава звездного населения диска и распределения пыли), оценить распределение звездной массы и центральной поверхностной плотности диска.

Несмотря на достаточное количество работ, в которых анализировались свойства галактических дисков (обзор работ приведен ниже), они обладают рядом недостатков. Как правило, в работах либо исследовались галактики с узко определенными

свойствами (например, только Sb-галактики [1], E-S0-галактики [2], галактики, наблюдаемые в положении “плашмя” [3], сильно наклоненные галактики [4]), либо декомпозиция проводилась в малом количестве фотометрических полос (как правило, — одной). Лишь в работе [3] была проведена шестицветная *BVRJHK*-фотометрия. В двух работах проводилась пятицветная фотометрия (*BVRJJK* в [4] и *UBVRI* в [5]). Это существенно снижает возможности анализа фотометрических параметров диска (например, отсутствие данных ИК-фотометрии не позволяет выделить влияние пыли на фотометрические свойства диска). Следует также отметить, что в большинстве работ проводилась одномерная декомпозиция излучения по радиальным профилям галактик. В ряде случаев одномерная декомпозиция может приводить к некорректному определению параметров диска и балджа [6].

Изучение фотометрических свойств дисков в оптическом и ИК-диапазонах позволяет помочь в решении ряда важных задач как фундаментального, так и прикладного характера. К фундаментальным задачам физики галактик относится вопрос

об образовании и эволюции дисков S0-галактик. Обсуждается несколько возможных механизмов быстрого истощения газа в линзовидных галактиках и, как следствие, отсутствие спиральных ветвей и заметного звездообразования. Рассматривая фотометрические свойства дисков спиральных и S0-галактик (“очищенных” от излучения балджа в линзовидных и излучения от спиральных ветвей в спиральных галактиках), мы можем определить их различия.

Важной проблемой прикладного характера является задача получения распределения массы в галактиках в целом и в их дисках. Эта задача решается сейчас с помощью двухмерных спектроскопических наблюдений. Существуют, однако, две проблемы. Первая связана с тем, что подобные наблюдения требуют больших телескопов и специальной приемной аппаратуры. Вторая проблема касается декомпозиции распределения массы на сферическую и “плоскую” составляющие. Для этого нам необходимо знать распределение излучения в диске и балдже соответствующей галактики. В общем случае, поверхностная плотность пропорциональна поверхностной яркости старого звездного населения, исправленной за поглощение, вызванное пылью. В первом приближении считается, что распределение массы соответствует распределению излучения в полосе  $K$ . Однако наблюдения в ИК-диапазоне гораздо более сложны (и менее распространены) в настоящий момент, чем наблюдения в полосах  $B$ ,  $V$ ,  $R$  и  $I$ . Данные каталога 2MASS ( $JHK$ -фотометрия) не позволяют, к сожалению, исследовать слабые внешние области галактик. Мы попытались определить, как распределение излучения (шкала диска) в оптических полосах связана с распределением излучения в ИК-области.

В данной работе, используя выборку из 401 галактики различных морфологических типов с широким диапазоном значений наклона диска и светимостей галактик, мы рассмотрели зависимость фотометрических параметров дисков от морфологического типа галактики, изменение показателей цвета диска вдоль радиуса, влияние пыли на фотометрические параметры дисков, зависимость наблюдаемых значений шкалы падения яркости от наклона диска, провели оценку значений поверхностной плотности и отношения масса/светимость для диска в центре галактики.

Авторами одной из первых работ, где рассматривались значения шкал падения яркости диска в более чем одном фильтре, были Элмегрин и Элмегрин [7]. Они провели одномерную декомпозицию и исследовали 34 слабо наклоненные спиральные (Sb–Sd) галактики без бара в полосах  $B$  и  $I$ , обнаружив, что среднее отношение шкал дисков  $\langle h(B)/h(I) \rangle = 1.16$ .

Пелетье и др. [8] изучили свойства дисков 37 галактик типа Sb–Sd различного наклона, используя одномерную декомпозицию на балдж и диск излучения галактик в фильтрах  $B$ ,  $R$  и  $K$ . Отношение шкал дисков  $h(B)/h(K)$ , полученное в их работе, составило в среднем 1.32 (диапазон значений — от 1 до 2), повышаясь с увеличением эллиптичности изофот (наклона) диска. Для S0-галактик значение  $\langle h(B)/h(I) \rangle = 1.04 \pm 0.05$  [9], что существенно ниже отношения  $h(B)/h(I)$  для спиральных галактик [8]. Согласно [8], наблюдается зависимость между центральной поверхностной яркостью диска в  $K$  и показателем цвета  $B - K$  в центре диска: более яркие центральные области являются более красными. Как следствие этого, авторы [8] полагают, что центры дисков в галактиках являются оптически толстыми в  $B$ -полосе, но оптически тонкими в  $K$ -полосе. По оценке [8], изменение состава звездного населения (его возраста и металличности) вдоль радиуса диска при отсутствии влияния пыли давало бы значение  $h(B)/h(K) \approx 1.1 - 1.2$ .

Куноу [1] исследовала, применяя одномерную декомпозицию, 14 Sb-галактик различного наклона в полосах  $BVRI$  с целью определения влияния пыли на фотометрические параметры дисков. Согласно [1], отношение шкал дисков в различных фильтрах растет с увеличением эллиптичности изофот ( $e \equiv 1 - b/a$ ): величины  $h(B)/h(I)$ ,  $h(V)/h(I)$  и  $h(R)/h(I)$  растут от 1.0 для дисков с  $e = 0$  до соответственно 1.8, 1.5 и 1.3 для дисков с  $e > 0.8$ . Это, по мнению автора [1], говорит об определяющей роли пыли (по сравнению с возрастом и химическим составом звездного населения) на отношение шкал падения яркости дисков в различных фотометрических полосах.

Расширив выборку до 60 Sa–Sbc-галактик (из которых 28 обладают признаками ядерной активности), Куноу [10] обнаружила отличие зависимостей  $h(B)/h(I)$ ,  $h(V)/h(I)$  и  $h(R)/h(I)$  от эллиптичности  $e$  для активных и нормальных галактик. В активных галактиках отношение шкал падения яркости дисков  $h(B)/h(I)$ ,  $h(V)/h(I)$  и  $h(R)/h(I)$  равны 1.0 независимо от наклона галактики. Для нормальных галактик были подтверждены данные, полученные в [1]. Согласно [10], для нормальных галактик средние значения  $\langle h(B)/h(I) \rangle = 1.30 \pm 0.04$ ,  $\langle h(V)/h(I) \rangle = 1.14 \pm 0.03$  и  $\langle h(R)/h(I) \rangle = 1.10 \pm 0.02$ . Модельный анализ влияния пыли на фотометрические свойства дисков показал, что оптическая толща пыли в центре галактики  $\tau_0(B) = 3^m \pm 2^m$  для нормальных галактик и  $\tau_0(B) = 0^m \pm 2^m$  для активных галактик, а отношение шкалы падения поверхностной плотности пыли к шкале падения яркости диска в  $B$  составляет  $h_\tau/h(I) = 0.96$  как для нормальных, так и для

активных галактик. Изучение зависимости параметра  $h(B)/h(I)$  от абсолютной звездной величины галактики  $M(B)$  и линейного значения шкалы падения диска  $h(I)$  показало, что отношение  $h(B)/h(I)$  не зависит от  $M(B)$ , однако, для нормальных галактик наблюдается слабая корреляция:  $h(B)/h(I) \approx h(I)/20 + 1$ , где  $h(I)$  измеряется в кпк.

Отметим, что авторы [11], исследовавшие 27 галактик в дальнем ИК-диапазоне (50 мкм и 100 мкм), также получили, что центры галактик являются оптически толстыми в  $B$ :  $\tau_0(B) = 4$ . “Теплая” и “холодная” пыль распределены в галактиках по-разному:  $h(100 \text{ мкм})/h(50 \text{ мкм}) = 1.21$ , причем  $h(B)/h(100 \text{ мкм}) = 1.12$  и  $h(B)/h(50 \text{ мкм}) = 1.36$ .

Исследованию сейфертовских галактик была посвящена работа [12], в которой изучались свойства 27 сейфертовских галактик различного наклона. Параметры дисков были получены на основе  $VRI$ -фотометрии с использованием одномерной декомпозиции излучения галактик. Было обнаружено, что центральная поверхностная яркость диска уменьшается с увеличением его размеров. Согласно [12],  $\langle h(V)/h(I) \rangle = 1.25$  и  $\langle h(R)/h(I) \rangle = 1.13$ . Это противоречит данным [10] для галактик с ядерной активностью.

Авторы [13] изучили 172 галактики небольшого наклона всех морфологических типов в фильтрах  $B$ ,  $V$ ,  $R$  и  $H$ , применяя одномерную декомпозицию на балдж и диск. Целью работы было определение истории звездообразования в дисках, градиента среднего возраста и металличности звездного населения с удалением от центра. Было показано, что в дисках галактик вне спиральных ветвей активных вспышек звездообразования не было как минимум последние 1–2 млрд. лет. Средние возрасты и металличности звездного населения дисков растут в галактиках при переходе от более поздних к более ранним морфологическим типам. Оба параметра (возраст и металличность) пропорциональны центральной поверхностной яркости диска и светимости галактики в ИК-полосах, а также максимальной скорости вращения. Возраст диска слабо коррелирует также с радиальным размером шкалы диска. С удалением от центра средний возраст и металличность звездного населения диска уменьшается. Градиент возраста с удалением от центра (в единицах шкалы диска) коррелирует со светимостью, размером и скоростью вращения галактики, уменьшаясь при переходе от поздних к ранним типам галактик. Для градиента металличности и градиента возраста, выраженного как функция от линейного расстояния, корреляции не были обнаружены. Согласно [13], пыль не вносит существенного вклада в радиальные изменения цвета диска.

Де Гриз [14] исследовал в  $BIK$ -фильтрах свойства 46 галактик различных морфологических типов, имеющих заметный наклон. В работе применялась одномерная декомпозиция излучения галактик на балдж и диск. Для галактик типа Sab и более поздних получены значения  $\langle h(B)/h(I) \rangle = 1.36 \pm 0.18$ ,  $\langle h(B)/h(K) \rangle = 1.65 \pm 0.41$  и  $\langle h(I)/h(K) \rangle = 1.15 \pm 0.19$ , причем диапазон значений увеличивается при переходе от ранних к поздним типам галактик. Для S0–Sa-галактик  $h(B)/h(I) \approx h(B)/h(K) \approx h(I)/h(K) \approx 1$ , а для галактик Scd-типа диапазон отношений шкал  $h(B)/h(I)$ ,  $h(B)/h(K)$  и  $h(I)/h(K)$  составляет 1–1.8, 1–2.2 и 1–1.5, соответственно. Отметим, что в выборке галактик [14] ряд других фотометрических параметров диска (в частности, центральная поверхностная яркость и линейная шкала диска в полосе  $K$ ) примерно постоянен для галактик типа S0–Sa:  $\mu_0(K) = 15^m - 16^m$ ,  $h(K) = 1 - 2$  кпк. В галактиках более поздних типов диапазон вычисленных параметров  $\mu_0(K)$  и  $h(K)$  растет при переходе от Sab- к Sd-галактикам. В Scd-галактиках  $\mu_0(K) = 15^m - 18^m$  и  $h(K) = 2 - 7$  кпк. Согласно выборке [14], интегральные показатели цвета диска  $B - I$ ,  $B - K$  и  $I - K$  практически не зависят от морфологического типа галактики. По расчетам [14], вызванное градиентом металличности звездного населения вдоль радиуса галактики значение  $h(B)/h(I)$  равняется 1.17 при отсутствии влияния пыли.

В последние годы для исследования свойств дисков и балджей галактик стала применяться двумерная декомпозиция излучения галактик, которая более корректно определяет фотометрические параметры балджей и дисков (а также и других компонент, например, баров). Можно отметить работу [2], в которой исследовались эллиптические и линзовидные галактики (всего 51 объект) в полосе  $R$ , работу [5], в которой были рассмотрены свойства 26 спиральных галактик с наклоном диска  $i < 65^\circ$  в фильтрах  $UBVRI$ , работу [4], в которой были изучены 7 галактик типа Sb–Sc, наблюдаемые “с ребра”, в полосах  $BVIJK$ , работу [3], в которой исследовались 86 спиральных галактик, наблюдаемых в положении “плашмя”, по данным  $BVRHK$ -фотометрии.

Молленхоф [5] исследовал шкалы дисков в различных фильтрах и обнаружил, что их значения монотонно понижаются от  $h(U)$  до  $h(I)$  для каждой конкретной галактики. Однако диапазон нормированных на  $h(I)$  значений шкал диска довольно широк: от 1.0 до 1.5 для величины  $h(U)/h(I)$ , от 1.0 до 1.4 для величины  $h(B)/h(I)$  и т.д. Интегральные показатели цвета дисков уменьшаются при переходе от Sa- к Sc-галактикам:  $U - B - 0.2^m$  до

Таблица 1. Основные сведения о галактиках

Параметр галактики	Номер галактики по NGC								
	524	532	783	1138	1589	2336	4136	5351	7280
Тип	-1.2	2.0	5.1	-2.1	1.8	4.0	5.3	3.1	-1.0
$M_B^{0,i}$ , зв. вел.	-21.63	-19.48	-21.14	-19.57	-21.73	-22.32	-18.41	-21.19	-19.41
$D$ , Мпк	32.4	31.5	70.5	32.9	49.5	32.2	76.0	48.9	25.9
$R_{25}$ , кпк	17.0	16.0	16.8	8.7	23.8	30.0	4.1	19.6	8.1
$V_{rot}$ , км/с	300	191	46	25	323	256	93	202	131
$e$	0.05	0.74	0.25	0.05	0.63	0.42	0.18	0.53	0.36
$A_i(B)$ , зв. вел.	0.00	0.49	0.30	0.00	0.54	0.39	0.06	0.39	0.00
$M_{dust}$ , $10^6 M_\odot$	0.35	3.3	26	—	1.3	9.7	0.17	1.3	0.056

$-0.2^m$ ,  $B - V$  — от  $0.75^m$  до  $0.5^m$ ,  $V - R$  — от  $0.45^m$  до  $0.35^m$  и  $R - I$  — от  $0.85^m$  до  $0.5^m$ .

Исследования [4] были посвящены, в частности, изучению структуры звездного и пылевого дисков. Было показано, что отношение радиальных шкал звездного и пылевого дисков в полосе  $V$  составляет  $h_{disk}/h_{dust} = 0.7 \pm 0.1$ , а вертикальных шкал —  $z_{disk}/z_{dust} = 1.8 \pm 0.6$ , причем  $h/z \sim 10$ . Таким образом, звездный диск оказывается более толстым, но менее протяженным, чем пылевой. Оптическая толщина пыли в центре галактик (вдоль полярной оси)  $\tau_0(B) = 0.4 - 1.0$ . Последний результат противоречит данным [8, 10, 11], согласно которым пылевые диски в центре галактик являются оптически толстыми в  $B$ .

Работа [3] в целом подтверждает результаты [5, 7, 8]: средние значения  $h(B)/h(I) = 1.12$ ,  $h(V)/h(I) = 1.04$ ,  $h(R)/h(I) = 1.03$ ,  $h(B)/h(H) = 1.18$ ,  $h(B)/h(K) = 1.22$  для галактик, наблюдаемых в положении “плашмя”.

## 2. ВЫБОРКА ГАЛАКТИК

Для изучения фотометрических параметров дисков галактик различных типов мы использовали данные работ [1–5, 7, 8, 10, 12–14] для 392 галактик (значения шкал дисков в  $B$  и  $I$  для 34 галактик, полученные в [7]; величины шкал и центральной поверхностной яркости дисков в  $BVRI$  для 62 галактик из [1, 10], в  $BVRH$  для 47 галактик из [13], в  $UBVRI$  для 26 галактик из [5], в  $R$  для 26 галактик из [2], в  $BVIJK$  для 6 галактик из [4], в  $VRI$  для 22 галактик из [12], в  $BRK$  для 37 галактик из [8], в  $BVRIJK$  для 86 галактик из [3], в  $BIK$  для 46 галактик из [14]) и полученные нами ранее результаты ПЗС-фотометрии 9 галактик [6, 15–17]). При выборе источников данных приоритет отдавался работам, в которых исследовались

фотометрические параметры дисков более чем в одной фотометрической полосе (исключая [2]). Интегральные параметры галактик (включая значения эллиптичности изофот диска  $e$ ) брались, либо рассчитывались по данным каталога LEDA. Используя полученные интегральные параметры, мы получали значения шкалы падения яркости диска  $h$  в кпк и центральные поверхностные яркости дисков  $\mu_{0,i}^0$  в зв. вел./кв. сек. дуги, исправленные за наклон галактики. Таким образом, располагая данными интегральных параметров галактик, полученными из единого источника — базы данных LEDA, нам удалось уменьшить разнородность выборки.

В ряде случаев дополнительно к общей выборке из 392 галактик мы рассматривали отдельно подвыборку из 144 галактик, исследовавшихся в [2–5] с применением двухмерной декомпозиции излучения галактик. Значения параметров дисков, определенные в этих работах, являются, по нашему мнению, более надежными, чем данные, полученные с использованием одномерной декомпозиции [6].

Дополнительно мы воспользовались полученными нами ранее результатами многоцветной ПЗС-фотометрии 9 галактик. Описание наблюдений и методики обработки данных  $UBVRI$ -фотометрии галактики NGC 2336 даны в [15],  $BVRI$ -фотометрии галактики NGC 4136 — в [16],  $BVRIJK$ -фотометрии галактики NGC 5351 — в [17],  $UBVRIJK$ -фотометрии галактик NGC 524, NGC 532, NGC 783, NGC 1138, NGC 1589 и NGC 7280 — в [6]. Дополнительно для галактик NGC 2336 и NGC 4136 были использованы данные каталога 2MASS (изображения в полосах  $J$ ,  $H$  и  $K$ ). Методика обработки изображений, взятых из каталога 2MASS, описана в работе [6]. Описание методики проведения

Таблица 2. Фотометрические параметры дисков галактик

NGC	Фильтр	$h$ , сек. дуги	$\mu_0$	$h$ , кпк	$\mu_{0,i}^0$	NGC	Фильтр	$h$ , сек. дуги	$\mu_0$	$h$ , кпк	$\mu_{0,i}^0$
524	<i>U</i>	$35.9 \pm 1.7$	$22.47 \pm 0.06$	$5.65 \pm 0.26$	22.53	2336	<i>U</i>	$99.6 \pm 34.2$	$22.30 \pm 0.07$	$15.55 \pm 5.35$	22.89
	<i>B</i>	$27.4 \pm 1.0$	$21.60 \pm 0.06$	$4.31 \pm 0.16$	21.66		<i>B</i>	$100.1 \pm 1.5$	$21.92 \pm 0.02$	$15.63 \pm 0.24$	22.51
	<i>V</i>	$27.4 \pm 1.0$	$20.58 \pm 0.06$	$4.31 \pm 0.16$	20.64		<i>V</i>	$82.9 \pm 0.8$	$21.18 \pm 0.01$	$12.94 \pm 0.12$	21.77
	<i>R</i>	$27.5 \pm 0.9$	$19.92 \pm 0.06$	$4.32 \pm 0.15$	19.98		<i>R</i>	$73.8 \pm 0.6$	$20.63 \pm 0.01$	$11.52 \pm 0.09$	21.22
	<i>I</i>	$27.4 \pm 0.8$	$19.14 \pm 0.05$	$4.30 \pm 0.12$	19.20		<i>I</i>	$72.3 \pm 0.8$	$20.00 \pm 0.02$	$11.29 \pm 0.13$	20.60
	<i>J</i>	$27.3 \pm 1.3$	$18.17 \pm 0.08$	$4.29 \pm 0.21$	18.22		<i>J</i>	$66.7 \pm 1.9$	$18.88 \pm 0.05$	$10.41 \pm 0.29$	19.47
	<i>H</i>	$26.3 \pm 1.3$	$17.39 \pm 0.08$	$4.13 \pm 0.21$	17.45		<i>H</i>	$75.0 \pm 2.6$	$18.37 \pm 0.05$	$11.71 \pm 0.41$	18.96
	<i>K</i>	$26.9 \pm 1.5$	$17.23 \pm 0.09$	$4.23 \pm 0.24$	17.29		<i>K</i>	$83.9 \pm 3.4$	$18.33 \pm 0.05$	$13.09 \pm 0.53$	18.92
532	<i>U</i>	$36.0 \pm 0.6$	$21.91 \pm 0.03$	$5.49 \pm 0.09$	23.37	4136	—	—	—	—	—
	<i>B</i>	$28.3 \pm 0.1$	$21.11 \pm 0.01$	$4.32 \pm 0.02$	22.57		<i>B</i>	$40.4 \pm 1.3$	$21.63 \pm 0.05$	$1.50 \pm 0.05$	21.85
	<i>V</i>	$27.6 \pm 0.1$	$20.15 \pm 0.01$	$4.21 \pm 0.02$	21.61		<i>V</i>	$35.5 \pm 1.0$	$20.84 \pm 0.05$	$1.31 \pm 0.04$	21.06
	<i>R</i>	$27.3 \pm 0.1$	$19.55 \pm 0.01$	$4.16 \pm 0.01$	21.02		<i>R</i>	$33.5 \pm 0.3$	$20.38 \pm 0.02$	$1.24 \pm 0.01$	20.60
	<i>I</i>	$28.1 \pm 0.1$	$18.92 \pm 0.01$	$4.29 \pm 0.01$	20.38		<i>I</i>	$28.6 \pm 1.2$	$19.57 \pm 0.09$	$1.05 \pm 0.04$	19.79
	<i>J</i>	$27.8 \pm 0.6$	$17.94 \pm 0.05$	$4.25 \pm 0.09$	19.40		<i>J</i>	$29.4 \pm 0.5$	$18.96 \pm 0.02$	$1.08 \pm 0.02$	19.17
	<i>H</i>	$28.0 \pm 0.4$	$17.13 \pm 0.03$	$4.28 \pm 0.07$	18.59		<i>H</i>	$29.3 \pm 1.0$	$18.33 \pm 0.04$	$1.08 \pm 0.04$	18.55
	<i>K</i>	$30.4 \pm 0.5$	$17.00 \pm 0.03$	$4.64 \pm 0.07$	18.46		<i>K</i>	$27.4 \pm 1.0$	$18.06 \pm 0.04$	$1.01 \pm 0.04$	18.28
783	<i>U</i>	$13.7 \pm 2.2$	$21.25 \pm 0.18$	$4.67 \pm 0.74$	21.56	5351	—	—	—	—	—
	<i>B</i>	$13.2 \pm 1.3$	$20.87 \pm 0.11$	$4.51 \pm 0.43$	21.18		<i>B</i>	$30.0 \pm 0.4$	$21.81 \pm 0.02$	$7.12 \pm 0.09$	22.63
	<i>V</i>	$12.3 \pm 0.8$	$19.99 \pm 0.08$	$4.21 \pm 0.26$	20.31		<i>V</i>	$28.5 \pm 0.3$	$20.84 \pm 0.03$	$6.76 \pm 0.08$	21.66
	<i>R</i>	$11.9 \pm 0.7$	$19.49 \pm 0.08$	$4.07 \pm 0.24$	19.80		<i>R</i>	$26.8 \pm 0.2$	$20.30 \pm 0.02$	$6.36 \pm 0.05$	21.12
	<i>I</i>	$11.0 \pm 0.3$	$18.79 \pm 0.03$	$3.77 \pm 0.11$	19.11		<i>I</i>	$27.4 \pm 0.4$	$19.31 \pm 0.03$	$6.51 \pm 0.09$	20.13
	<i>J</i>	$11.4 \pm 0.4$	$17.85 \pm 0.05$	$3.89 \pm 0.15$	18.16		<i>J</i>	$22.7 \pm 0.2$	$18.20 \pm 0.03$	$5.37 \pm 0.06$	19.02
	<i>H</i>	$10.9 \pm 0.4$	$17.10 \pm 0.06$	$3.73 \pm 0.15$	17.41		<i>H</i>	$22.1 \pm 1.7$	$17.54 \pm 0.20$	$5.23 \pm 0.40$	18.63
	<i>K</i>	$10.7 \pm 1.1$	$16.85 \pm 0.14$	$3.66 \pm 0.36$	17.16		<i>K</i>	$22.7 \pm 0.4$	$17.23 \pm 0.04$	$5.39 \pm 0.10$	18.05
1138	<i>U</i>	$57.5 \pm 41.9$	$23.16 \pm 0.27$	$9.17 \pm 6.69$	23.22	7280	<i>U</i>	$57.2 \pm 3.5$	$22.85 \pm 0.03$	$7.19 \pm 0.45$	23.33
	<i>B</i>	$28.0 \pm 1.4$	$22.85 \pm 0.04$	$4.47 \pm 0.23$	22.90		<i>B</i>	$37.1 \pm 1.7$	$22.06 \pm 0.03$	$4.65 \pm 0.21$	22.54
	<i>V</i>	$23.6 \pm 1.2$	$21.76 \pm 0.05$	$3.76 \pm 0.19$	21.82		<i>V</i>	$31.9 \pm 1.6$	$21.02 \pm 0.04$	$4.01 \pm 0.20$	21.51
	<i>R</i>	$24.1 \pm 1.0$	$21.14 \pm 0.04$	$3.84 \pm 0.16$	21.19		<i>R</i>	$30.6 \pm 1.4$	$20.41 \pm 0.04$	$3.85 \pm 0.18$	20.89
	<i>I</i>	$26.1 \pm 1.3$	$20.30 \pm 0.05$	$4.16 \pm 0.20$	20.36		<i>I</i>	$30.5 \pm 1.1$	$19.70 \pm 0.03$	$3.83 \pm 0.14$	20.19
	<i>J</i>	$26.8 \pm 1.5$	$19.30 \pm 0.06$	$4.27 \pm 0.23$	19.35		<i>J</i>	$33.7 \pm 1.2$	$19.00 \pm 0.04$	$4.23 \pm 0.15$	19.49
	<i>H</i>	$26.5 \pm 1.1$	$18.64 \pm 0.05$	$4.23 \pm 0.18$	18.69		<i>H</i>	$29.7 \pm 0.7$	$18.28 \pm 0.03$	$3.72 \pm 0.09$	18.77
	<i>K</i>	$28.2 \pm 2.5$	$18.53 \pm 0.10$	$4.49 \pm 0.39$	18.58		<i>K</i>	$33.0 \pm 2.0$	$18.02 \pm 0.07$	$4.14 \pm 0.25$	18.51
1589	<i>U</i>	$33.9 \pm 1.2$	$21.16 \pm 0.03$	$8.14 \pm 0.28$	22.24						
	<i>B</i>	$29.5 \pm 0.6$	$20.61 \pm 0.02$	$7.08 \pm 0.14$	21.68						
	<i>V</i>	$28.1 \pm 0.5$	$19.59 \pm 0.02$	$6.74 \pm 0.11$	20.67						
	<i>R</i>	$27.0 \pm 0.4$	$19.00 \pm 0.02$	$6.48 \pm 0.10$	20.08						
	<i>I</i>	$27.2 \pm 0.4$	$18.31 \pm 0.02$	$6.52 \pm 0.10$	19.39						
	<i>J</i>	$27.8 \pm 1.0$	$17.30 \pm 0.04$	$6.67 \pm 0.25$	18.38						
	<i>H</i>	$24.9 \pm 0.7$	$16.49 \pm 0.04$	$5.99 \pm 0.17$	17.57						
	<i>K</i>	$24.6 \pm 0.7$	$16.24 \pm 0.04$	$5.90 \pm 0.17$	17.32						

**Таблица 3.** Средние центральные поверхностные яркости и показатели цвета дисков

Фильтр или показатель цвета	Выборка 392 галактик	Выборка 144 галактик	Выборка 9 галактик
$X$	$\mu_{0,i}^0(X)$		
$U$	$21.14 \pm 1.08$	$21.14 \pm 1.08$	$22.74 \pm 0.67$
$B$	$21.04 \pm 0.86$	$21.32 \pm 0.91$	$22.17 \pm 0.59$
$V$	$20.57 \pm 0.90$	$20.64 \pm 0.87$	$21.23 \pm 0.57$
$R$	$20.15 \pm 0.92$	$20.31 \pm 1.03$	$20.66 \pm 0.56$
$I$	$19.75 \pm 0.94$	$19.69 \pm 0.96$	$19.90 \pm 0.55$
$J$	—	—	$18.96 \pm 0.55$
$H$	$18.02 \pm 1.10$	$18.34 \pm 1.25$	$18.26 \pm 0.61$
$K$	$18.03 \pm 1.13$	$18.17 \pm 1.14$	$18.06 \pm 0.65$
$X - Y$	$(X - Y)_{0,i}^0$		
$U - B$	$0.05 \pm 0.20$	$0.05 \pm 0.20$	$0.58 \pm 0.24$
$B - V$	$0.42 \pm 0.46$	$0.65 \pm 0.26$	$0.94 \pm 0.12$
$V - R$	$0.30 \pm 0.31$	$0.44 \pm 0.21$	$0.57 \pm 0.06$
$V - I$	$1.02 \pm 0.31$	$0.99 \pm 0.28$	$1.32 \pm 0.12$
$J - H$	—	—	$0.70 \pm 0.10$
$H - K$	$0.15 \pm 0.22$	$0.19 \pm 0.32$	$0.20 \pm 0.09$
$B - H$	$3.15 \pm 0.59$	$2.97 \pm 0.60$	$3.91 \pm 0.33$
$J - K$	—	—	$0.90 \pm 0.16$
$X - Y$	$(X - Y)_{0,i}^{R_{25}}$		
$U - B$	$-0.12 \pm 0.60$	$-0.12 \pm 0.60$	$-0.02 \pm 0.38$
$B - V$	$0.39 \pm 0.34$	$0.38 \pm 0.37$	$0.69 \pm 0.23$
$V - R$	$0.31 \pm 0.50$	$0.37 \pm 0.29$	$0.45 \pm 0.16$
$V - I$	$0.72 \pm 0.69$	$0.78 \pm 0.39$	$1.13 \pm 0.40$
$J - H$	—	—	$0.61 \pm 0.16$
$H - K$	$0.18 \pm 0.32$	$0.18 \pm 0.32$	$0.28 \pm 0.16$
$B - H$	$2.30 \pm 0.66$	$2.32 \pm 0.66$	$3.33 \pm 0.64$
$J - K$	—	—	$0.89 \pm 0.25$

двухмерной декомпозиции излучения галактик на балдж и диск приведено в [6].

В табл. 1 представлены основные сведения о 9 галактиках: тип, абсолютная звездная величина  $M_B^{0,i}$ , исправленная за поглощение в Галактике и поглощение, вызванное наклоном, расстояние до галактики  $D$  в Мпк, радиус галактики  $R_{25}$  в кпк, определенный по изофоте  $25^m$ /кв. сек. дуги в  $B$ , максимальная скорость вращения  $V_{rot}$  в км/с, исправленная за наклон, эллиптичность изофот диска  $e$ , поглощение  $A_i(B)$  в звездных величинах в

$B$ , вызванное наклоном диска и масса пыли  $M_{dust}$ , выраженная в массах Солнца. Тип галактик и значения  $M_B^{0,i}$ ,  $V_{rot}$  и  $A_i(B)$  были взяты из электронной базы данных LEDA. Величины  $D$  и  $R_{25}$  были также получены по данным каталога LEDA (использовалось значение постоянной Хаббла  $H_0 = 75$  км/с·Мпк). Значения  $e$  для дисков галактик были получены нами в работах [6, 15–17]. Источники данных для значений  $M_{dust}$  для большинства галактик и  $V_{rot}$  для NGC 1138 см. в [6, 15]. Данные по массе пыли в NGC 4136 и NGC 5351 были взяты из работ [18] и [19], соответственно.

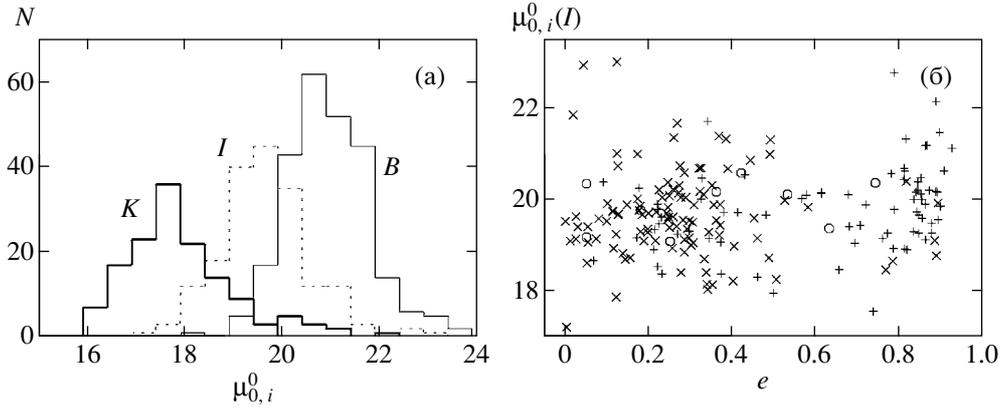
Фотометрические параметры дисков 9 галактик, полученные в различных фильтрах, приведены в табл. 2. В первой колонке таблицы приведен номер галактики, во второй — указаны фильтры, в которых производились измерения, в третьей — шкалы падения яркости диска  $h$  в угл. сек. дуги и ошибки их измерений, в четвертой — центральные поверхностные яркости дисков  $\mu_0$  в зв. вел./кв. сек. дуги, исправленные за поглощение света в Галактике, и ошибки измерений, в пятой — шкалы падения яркости диска  $h$  в кпк (с ошибками измерений), в шестой — центральные поверхностные яркости дисков  $\mu_{0,i}^0$  в зв. вел./кв. сек. дуги, исправленные за фотометрическую ( $A_i$ ) и геометрическую ( $A_g$ ) поправки, вызванные наклоном галактики. Исправление значений центральной поверхностной яркости проводилось по стандартной формуле  $\mu_{0,i} = \mu_0 - A_i - A_g$ , где  $A_g = 2.5 \lg(1 - e)$ . Колонки 7–12 таблицы аналогичны колонкам 1–6.

### 3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

#### 3.1. Центральные поверхностные яркости и показатели цвета дисков

Несмотря на то, что рассматриваемые галактики сильно отличаются друг от друга по светимости ( $L(B)_{\max} = 100L(B)_{\min}$ ) и размерам ( $R_{25} = 2-40$  кпк), значения центральных поверхностных яркостей дисков галактик  $\mu_{0,i}^0$  лежат в достаточно узком диапазоне  $20.2^m$ /кв. сек. дуги —  $22.7^m$ /кв. сек. дуги в полосе  $B$  или  $16.9^m$ /кв. сек. дуги —  $19.3^m$ /кв. сек. дуги в полосе  $K$  (рис. 1а и табл. 3). Таким образом, значения поверхностной яркости диска в центре среди галактик рассматриваемой выборки отличаются не более, чем в 10 раз. График, представленный на рис. 1б, показывает отсутствие зависимости между исправленной за наклон центральной поверхностной яркостью  $\mu_{0,i}^0$  и наклоном диска.

Рассмотрим зависимость величины центральной поверхностной яркости дисков, измеренных в



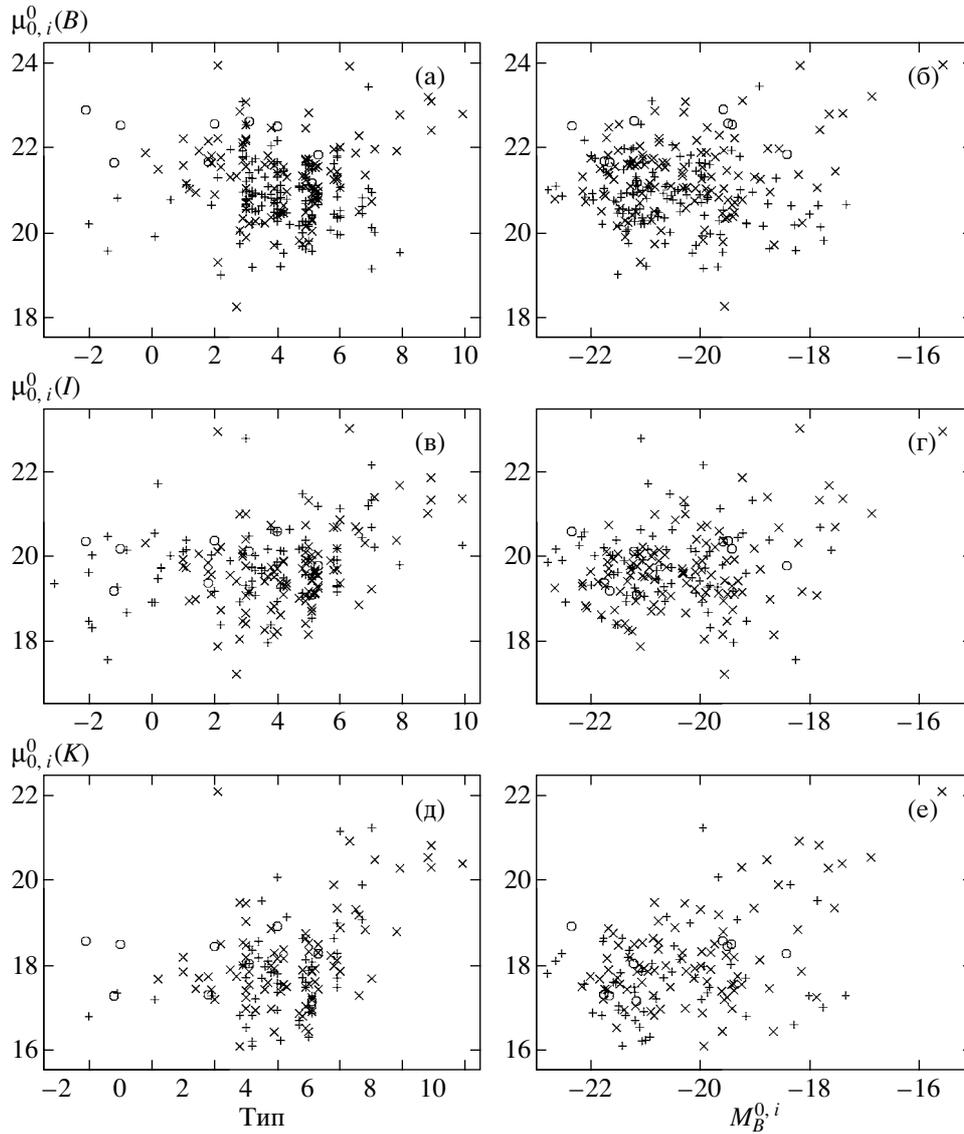
**Рис. 1.** (а) — Распределение галактик по значениям центральной поверхностной яркости  $\mu_{0,i}^0$  их дисков в полосе  $B$  (тонкая сплошная линия),  $I$  (штриховая линия) и  $K$  (жирная сплошная линия). (б) — Зависимость между центральной поверхностной яркостью  $\mu_{0,i}^0(I)$  и эллиптичностью изопот  $e$  дисков. Кружки — объекты выборки 9 галактик, косые крестики — объекты подвыборки 144 галактик, прямые крестики — остальные объекты выборки 392 галактик.

различных фотометрических полосах, от светимости и типа галактики (рис. 2). Несмотря на достаточно большой разброс данных на соответствующих графиках, наблюдается корреляция между значениями  $\mu_{0,i}^0$  и  $M_B^{0,i}$  и  $\mu_{0,i}^0$  и типом галактик в длинноволновых полосах (рис. 2в–2е). В нашей выборке наблюдается слабая корреляция между светимостью галактики и ее типом: отсутствуют яркие галактики типов Sd–Irr, поэтому определить, какой именно параметр (светимость или тип) влияет на значения  $\mu_{0,i}^0$ , довольно затруднительно. Рассматривая выборку 144 галактик, параметры дисков которых были получены с применением двумерной декомпозиции, мы обнаружили, что величины центральных поверхностных яркостей дисков галактик ранних типов (S0–Sc) в  $B$ ,  $I$  и  $K$  не зависят от значений  $M_B^{0,i}$  и морфологического типа (коэффициент корреляции  $|r| < 0.3$ ). Для спиральных галактик поздних типов (начиная с Sc) и неправильных галактик мы получили следующие зависимости:  $\mu_{0,i}(K) \sim (0.26 \pm 0.13)T + (0.54 \pm 0.14)M_B^{0,i}$  (коэффициент корреляции  $r = 0.7$ ),  $\mu_{0,i}(I) \sim (0.24 \pm 0.13)T + (0.33 \pm 0.12)M_B^{0,i}$  ( $r = 0.7$ ) и  $\mu_{0,i}(B) \sim (0.28 \pm 0.11)T + (0.21 \pm 0.10)M_B^{0,i}$  ( $r = 0.6$ ). Таким образом, можно утверждать, что центральная поверхностная яркость дисков галактик поздних типов растет с увеличением интегральной светимости галактик. Вторым выводом касается зависимости  $\mu_{0,i}^0$  от морфологического типа галактики. В целом, рассматривая галактики всех морфологических типов, мы получили зависимости  $\mu_{0,i}(K) \sim (0.16 \pm 0.06)T$  ( $r = 0.45$ ) и  $\mu_{0,i}(I) \sim (0.13 \pm 0.05)T$  ( $r = 0.33$ ). Значения  $\mu_{0,i}(B)$  не зависят от типа галактики (рис. 2а,

2в, 2д). Таким образом, центральная “красная” яркость диска в центре в среднем уменьшается при переходе от более ранних к более поздним типам галактик, а центральная яркость в голубой области спектра остается постоянной для галактик всех морфологических типов (рис. 2а, 2в, 2д). Последний вывод является достаточно спорным и может быть следствием эффекта селекции объектов (более детальное обсуждение данного вывода будет приведено ниже). Реально можно утверждать только о зависимости центральных показателей цвета дисков от типа галактики (см. ниже).

На рис. 3а–3б приведены зависимости центральных показателей цвета диска  $(B - V)_{0,i}^0$  и  $(V - I)_{0,i}^0$  от типа галактики. Как видно из рисунка, центры дисков галактик ранних типов краснее центров дисков галактик поздних типов:  $(B - V)_{0,i}^0 \sim (-0.02 \pm 0.01)T$  для всех трех выборок (коэффициенты корреляции  $|r| = 0.26, 0.29$  и  $0.96$  для выборок 392, 144 и 9 галактик, соответственно) и  $(V - I)_{0,i}^0 \sim (-0.070 \pm 0.015)T$  для выборок 392 и 144 галактик с  $|r| = 0.11$  и  $0.40$ , соответственно (для выборки 9 галактик зависимость оказалась более слабой:  $(V - I)_{0,i}^0 \sim (-0.025 \pm 0.015)T$ ,  $|r| = 0.60$ ). Аналогичные зависимости получаются и для других показателей цвета, кроме  $J - H$  и  $H - K$ .

Рассчитанные по формуле  $(X - Y)_{0,i}^{R_{25}} = (X - Y)_{0,i}^0 + 1.086R_{25}[1/h(X) - 1/h(Y)]$  показатели цвета на краю диска (на расстоянии  $R_{25}$  от центра галактики) показывают такую же зависимость от типа галактики, как и показатели цвета диска в центре:  $(B - V)_{0,i}^{R_{25}} \sim (-0.02 \pm 0.01)T$  (рис. 3в). Данная зависимость одинакова для всех трех выборок галактик, однако коэффициенты корреляции



**Рис. 2.** Зависимости центральной поверхностной яркости диска  $\mu_{0,i}^0$  в полосах  $B$  (а, б),  $I$  (в, г) и  $K$  (д, е) от типа (а, в, д) и абсолютной звездной величины  $M_B^{0,i}$  (б, г, е) галактики. Обозначения — те же, что на рис. 1б.

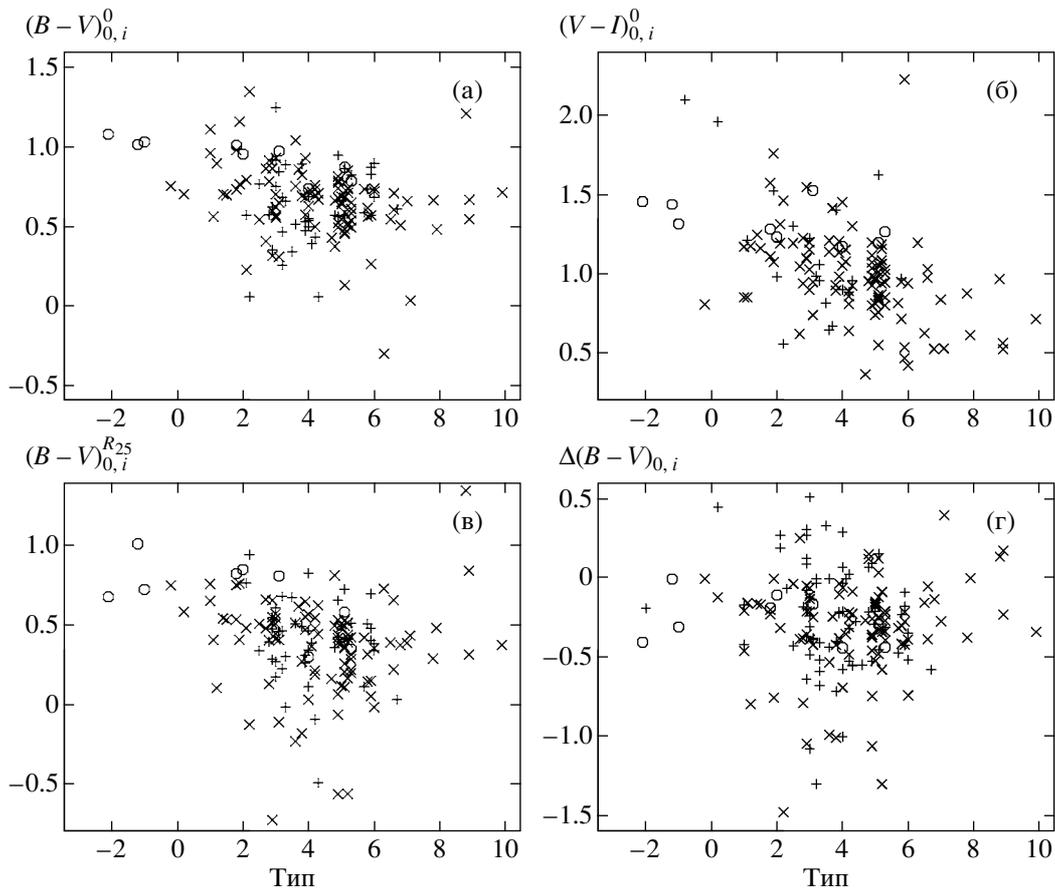
невелики: лишь для выборки 9 галактик  $|r| = 0.70$ ; для двух других выборок  $|r| < 0.2$ . Таким образом, оказывается, что радиальный градиент цвета диска  $\Delta(B - V)_{0,i} = (B - V)_{0,i}^{R_{25}} - (B - V)_{0,i}^0$  не зависит от морфологического типа галактики (рис. 3г). Большинство дисков галактик любых типов “голубеют” к периферии.

Корреляции между показателями цвета дисков и значениями светимости и наклона галактик не обнаружено.

### 3.2. Двухцветные диаграммы

Провести качественную оценку состава звездного населения дисков, истории звездообразования

в них, исследовать влияние пыли можно с помощью двухцветных диаграмм (рис. 4а, 4б). Несмотря на достаточно большой разброс данных, точки, характеризующие показатели цвета дисков, концентрируются к нормальной последовательности интегральных цветов галактик (НПЦ). Радиальные изменения показателей цвета дисков также происходят вдоль НПЦ. Линия НПЦ на диаграммах является геометрическим местом точек, характеризующим показатели цвета старых звездных систем со звездообразованием, затухающим по экспоненциальному закону, причем темп звездообразования тем выше, чем меньше значения показателей цвета. Как видно из рис. 4а,б, большинство дисков галактик имеют стандартное звездное население (показатели цвета соответствуют НПЦ), средний



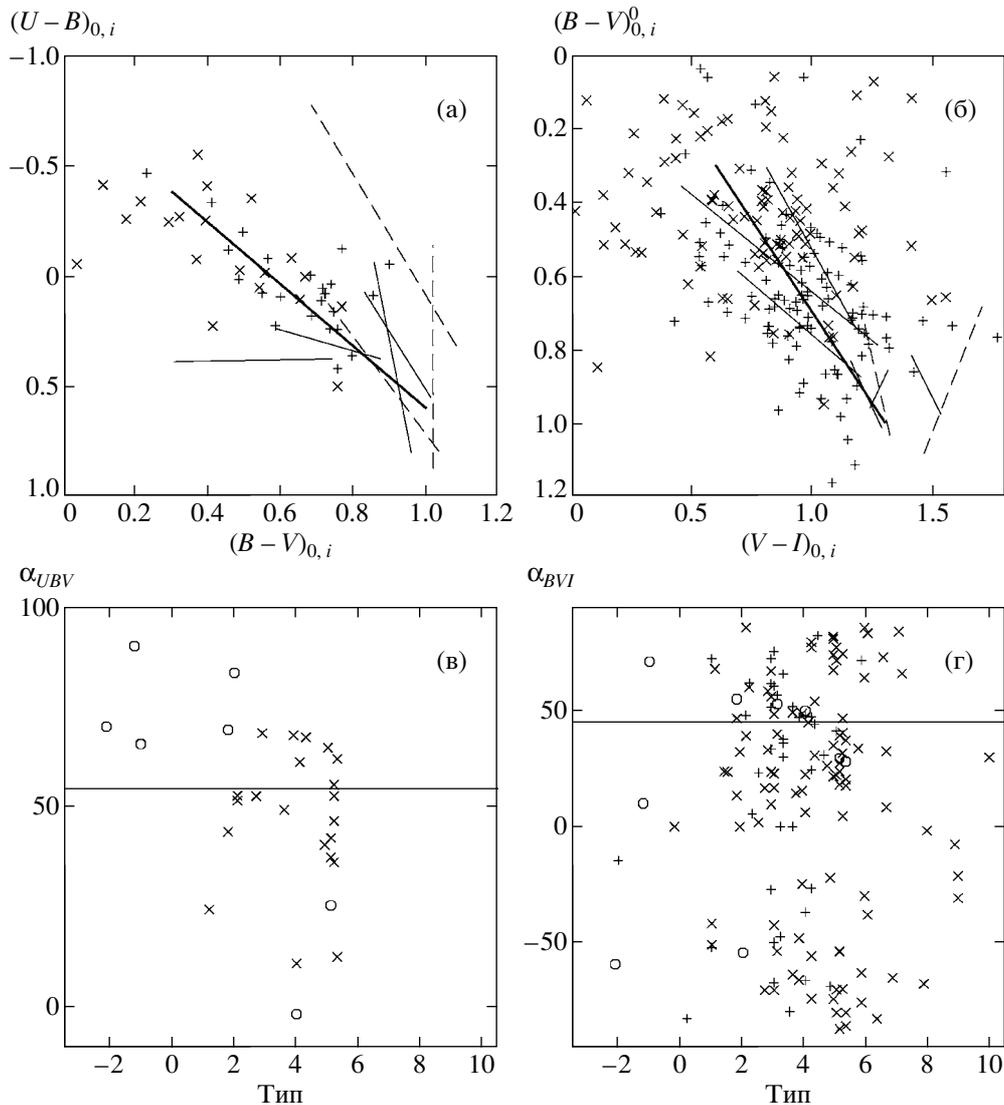
**Рис. 3.** Зависимости центральных показателей цвета диска  $(B - V)_{0,i}^0$  (а) и  $(V - I)_{0,i}^0$  (б), показателя цвета  $(B - V)_{0,i}^{R_{25}}$  на краю диска (в) и радиального градиента цвета  $\Delta(B - V)_{0,i}$  (г) от типа галактики. Обозначения — те же, что на рис. 1б.

“фотометрический” возраст которого уменьшается с удалением от центра галактики.

Отклонение точек от НПЦ на диаграммах служит либо характеристикой молодости звездного населения (т.е. отсутствия (недостатка) в системе звезд первого поколения), либо признаком недавней вспышки звездообразования. Для изучения радиальных изменений состава звездного населения в дисках мы использовали параметр  $\alpha$  — угол наклона прямой, характеризующей радиальное изменение показателей цвета диска галактики. В частности,  $\text{tg } \alpha_{UBV} = \Delta(U - B) / \Delta(B - V)$  и  $\text{tg } \alpha_{BVI} = \Delta(B - V) / \Delta(V - I)$ . Для нормальной последовательности цветов  $\alpha_{UBV} = 55^\circ$  и  $\alpha_{BVI} = 45^\circ$ . Чем больше разница  $\alpha - \alpha_{\text{НПЦ}}$  для диска галактики, тем больше его звездное население отличается от стандартного с удалением от центра галактики. На рис. 4в, 4г представлены графики зависимости  $\alpha_{UBV}$  и  $\alpha_{BVI}$  от морфологического типа галактики. Разброс значений на графиках достаточно большой, однако средние значения  $\alpha$  оказываются близкими к  $\alpha_{\text{НПЦ}}$ :  $\langle \alpha_{UBV} \rangle = 48^\circ \pm 17^\circ$  для выборки 392 и 144 галактик (наблюдения

в  $U$  проводились только в работе [5]) и  $57^\circ \pm 33^\circ$  для выборки 9 галактик; соответствующие значения для  $\alpha_{BVI} - 41^\circ \pm 25^\circ$ ,  $39^\circ \pm 27^\circ$  и  $42^\circ \pm 21^\circ$ . Однако, если, как следует из рис. 4г, значения  $\alpha_{BVI}$  не зависят от типа, то на рис. 4в заметна корреляция: значения  $\alpha_{UBV}$  уменьшаются от галактик ранних типов к галактикам поздних типов. Для многих спиральных галактик поздних типов (Sb–Sc) характерные значения  $\alpha_{UBV}$  лежат в пределах  $10^\circ - 40^\circ$ . Согласно модельным расчетам (см., например, [15]), это свидетельствует о заметном градиенте среднего “фотометрического” возраста звезд в диске: молодое звездное население на периферии дисков подавляет излучение старого звездного населения.

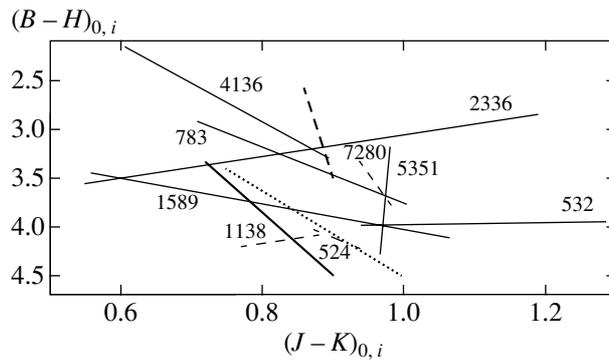
Интерпретация результатов, полученных с помощью двухцветных диаграмм  $(U - B)_{0,i} - (B - V)_{0,i}$  и  $(B - V)_{0,i} - (V - I)_{0,i}$ , может быть неоднозначной из-за того, что изменение металличности и возраста звезд и значений селективного поглощения пыли смещает точки на этих диаграммах в одном направлении — вдоль НПЦ. Для разделения эффектов влияния пыли, изменений воз-



**Рис. 4.** Двухцветные диаграммы  $(U - B)_{0,i} - (B - V)_{0,i}$  (а) и  $(B - V)_{0,i} - (V - I)_{0,i}$  (б) для дисков галактик и зависимости параметров  $\alpha_{UBV}$  (в) и  $\alpha_{BVI}$  (г) от типа галактики. Прямые крестики соответствуют цветам в центрах дисков, косые крестики — цветам на краю дисков (для объектов из выборки 392 галактик), кружки — объекты выборки 9 галактик. На графиках (а) и (б) жирные сплошные линии — НПЦ по [20], тонкие сплошные линии — радиальные изменения цвета в дисках спиральных галактик, штриховые линии — радиальные изменения цвета в дисках S0-галактик (для объектов из выборки 9 галактик). Горизонтальные линии на рис. 4в,г соответствуют значениям  $\alpha_{НПЦ}$ .

раста и химического состава можно использовать двухцветные диаграммы с ИК-показателями цвета. На рис. 5 представлена диаграмма  $(B - H)_{0,i} - (J - K)_{0,i}$ . Согласно моделям [21], изменение возраста звездного населения влияет в основном на показатель цвета  $B - H$ , а изменение металличности звездного населения и поглощения, связанного с наличием пыли, — на показатель цвета  $J - K$  (рис. 5). К сожалению, ранее фотометрические параметры дисков одновременно в полосах  $BJK$  не исследовались, поэтому мы можем рассмотреть на диаграмме цветовые характеристики только 9 галактик, наблюдавшихся нами.

Отметим, что отрезки, характеризующие радиальное изменение показателей цвета дисков, для S0-Sa-галактик заметно короче, чем для спиральных галактик (рис. 5). Это говорит о малых радиальных изменениях в составе звездного населения и слабом влиянии пыли в линзовидных галактиках. В галактике промежуточного типа S0-a NGC 7280 мы, однако, наблюдаем уменьшение среднего возраста звездного населения диска с удалением от центра галактики, что характерно для спиральных галактик. Для всех спиральных галактик характерны сильные радиальные градиенты металличности звездного населения, возможно с удалением



**Рис. 5.** Двухцветная диаграмма  $(B - H)_{0,i} - (J - K)_{0,i}$  для дисков. Тонкие сплошные и штриховые линии показывают смещение точек из-за поглощения, вызванного пылью, на величину  $A_V = 1.0^m$  (влево вверх). Пунктирная линия – градиент металличности для звездной системы с возрастом  $10^{10}$  лет (по [21]). Жирная штриховая линия – вектор смещения точек в случае вспышки звездообразования [21]. Системы с большей металличностью имеют больший показатель цвета  $J - K$ . Жирная и тонкая штриховые линии обозначают то же, что на на рис. 4а,б. На графике приведены номера галактик NGC.

от центра увеличивается поглощение, связанное с наличием пыли (кроме NGC 5351). Для спиральных галактик поздних типов (Sbc–Scd) характерно также уменьшение среднего возраста звездного населения диска, причем наблюдается зависимость: чем меньше средний возраст диска, тем больше градиент уменьшения возраста от центра к краю галактики. Исключение здесь составляет галактика NGC 2336 с относительно молодым звездным населением, возраст которого не меняется с удалением от центра галактики.

Соответствующий график зависимости  $h(I)$  от типа представлен на рис. 6в; аналогичные графики получаются и для значений  $h$ , полученных в других фотометрических полосах. Возможный гра-

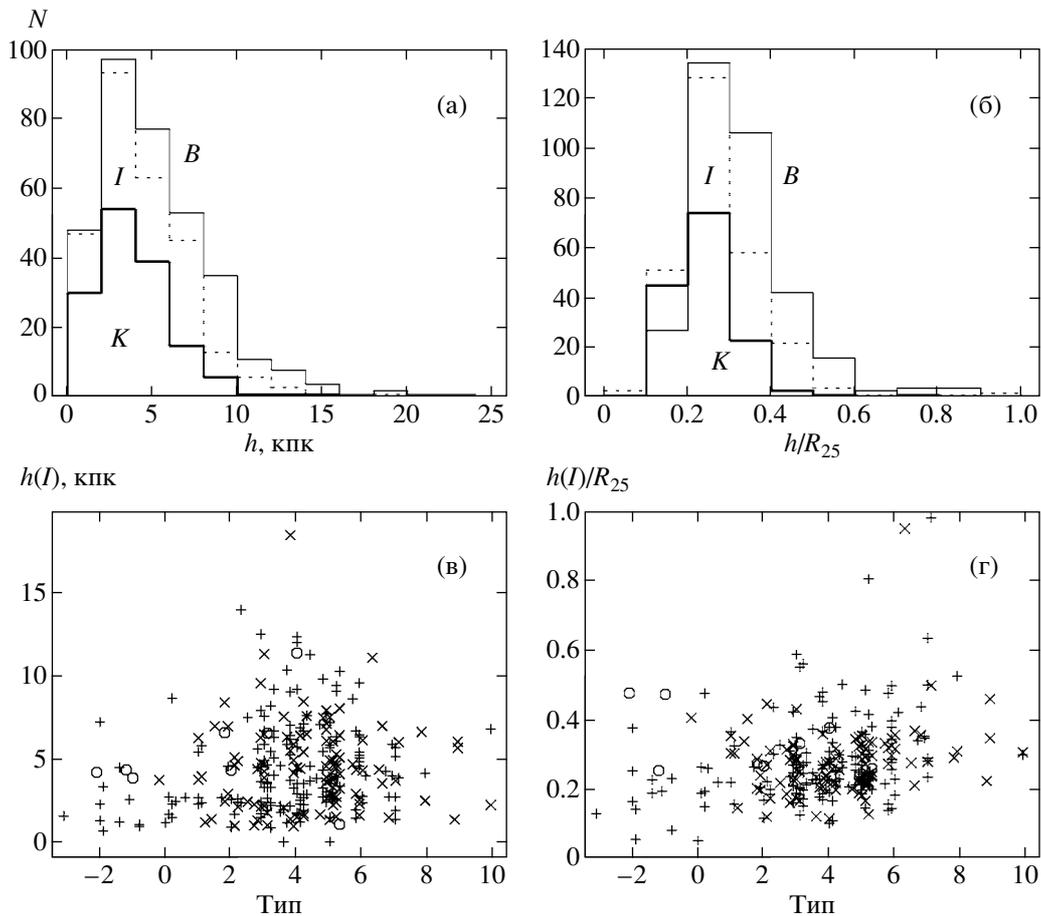
**Таблица 4.** Абсолютные и относительные значения шкал дисков

Фильтр	Выборка 392 галактик	Выборка 144 галактик	Выборка 9 галактик
$X$	$h(X)$ , кпк		
$U$	$4.2 \pm 2.2$	$4.2 \pm 2.2$	$8.0 \pm 3.7$
$B$	$5.4 \pm 3.4$	$5.1 \pm 3.4$	$5.9 \pm 4.0$
$V$	$4.8 \pm 2.9$	$4.6 \pm 2.7$	$5.4 \pm 3.3$
$R$	$4.8 \pm 3.1$	$4.8 \pm 3.4$	$5.1 \pm 2.9$
$I$	$4.4 \pm 2.7$	$4.4 \pm 2.6$	$5.1 \pm 2.8$
$J$	–	–	$4.9 \pm 2.5$
$H$	$3.9 \pm 1.8$	$3.8 \pm 1.9$	$4.9 \pm 2.9$
$K$	$4.1 \pm 2.4$	$4.3 \pm 2.4$	$5.2 \pm 3.3$
$X$	$h(X)/R_{25}$		
$U$	$0.28 \pm 0.09$	$0.28 \pm 0.09$	$0.54 \pm 0.31$
$B$	$0.33 \pm 0.13$	$0.31 \pm 0.09$	$0.38 \pm 0.12$
$V$	$0.29 \pm 0.10$	$0.29 \pm 0.10$	$0.34 \pm 0.09$
$R$	$0.30 \pm 0.15$	$0.32 \pm 0.19$	$0.33 \pm 0.08$
$I$	$0.28 \pm 0.13$	$0.28 \pm 0.10$	$0.33 \pm 0.09$
$J$	–	–	$0.33 \pm 0.11$
$H$	$0.27 \pm 0.12$	$0.29 \pm 0.15$	$0.32 \pm 0.10$
$K$	$0.25 \pm 0.08$	$0.17 \pm 0.08$	$0.33 \pm 0.12$

**3.3. Абсолютные и относительные размеры дисков**

Диапазон значений как абсолютных, так и относительных размеров дисков в галактиках еще более узок, чем диапазон значений центральной поверхностной яркости (рис. 6а,б). Абсолютные значения шкал длины дисков подавляющего большинства галактик лежат в пределах 2–7 кпк, а значения относительных шкал  $h/R_{25} = 0.20-0.40$ . Средние значения  $h$  и  $h/R_{25}$ , измеренные в различных фотометрических полосах, представлены в табл. 4. Отметим, что дисперсия значений  $h$  и  $h/R_{25}$  намного превосходит разницу между абсолютными и относительными значениями шкал дисков, измеренных в различных фильтрах (исключая наиболее коротковолновые фильтры  $U$  и  $B$ ). В среднем, величины  $h$  и  $h/R_{25}$ , измеренные в различных фильтрах, уменьшаются от коротковолновых ( $U$ ) к длинноволновым ( $K$ ) фотометрическим полосам. Однако линейные размеры дисков  $h(J)$  и  $h(H)$  оказываются систематически меньше значений  $h(K)$ . Вероятно, это является следствием того, что ИК-показатели цвета  $J - H$  и  $H - K$  не чувствительны к возрасту звездного населения.

Величина линейной шкалы диска практически не зависит от морфологического типа галактик.



**Рис. 6.** Распределение галактик по значениям абсолютной  $h$  (а) и относительной  $h/R_{25}$  (б) радиальной шкалы падения яркости их дисков в полосе  $B$  (тонкая сплошная линия),  $I$  (штриховая линия) и  $K$  (жирная сплошная линия) и зависимость абсолютного (в) и относительного (г) размера диска от типа галактики. Обозначения на графиках (в) и (г) — те же, что на рис. 1б.

диент величины  $h(I)$  от типа много меньше диапазона значений  $h(I)$  для каждого конкретного морфологического типа. Отметим, в что S0- и Sd-Irr-галактиках диапазон значений  $h(I)$  в два раза меньше, чем в спиральных галактиках: 1–6 кпк против 1–12 кпк (рис. 6в). За единственным исключением, линейные шкалы падения яркости дисков S0-галактик не превышают 5 кпк. При этом в нашей выборке присутствуют S0-галактики умеренной и высокой (например, NGC 524) светимости.

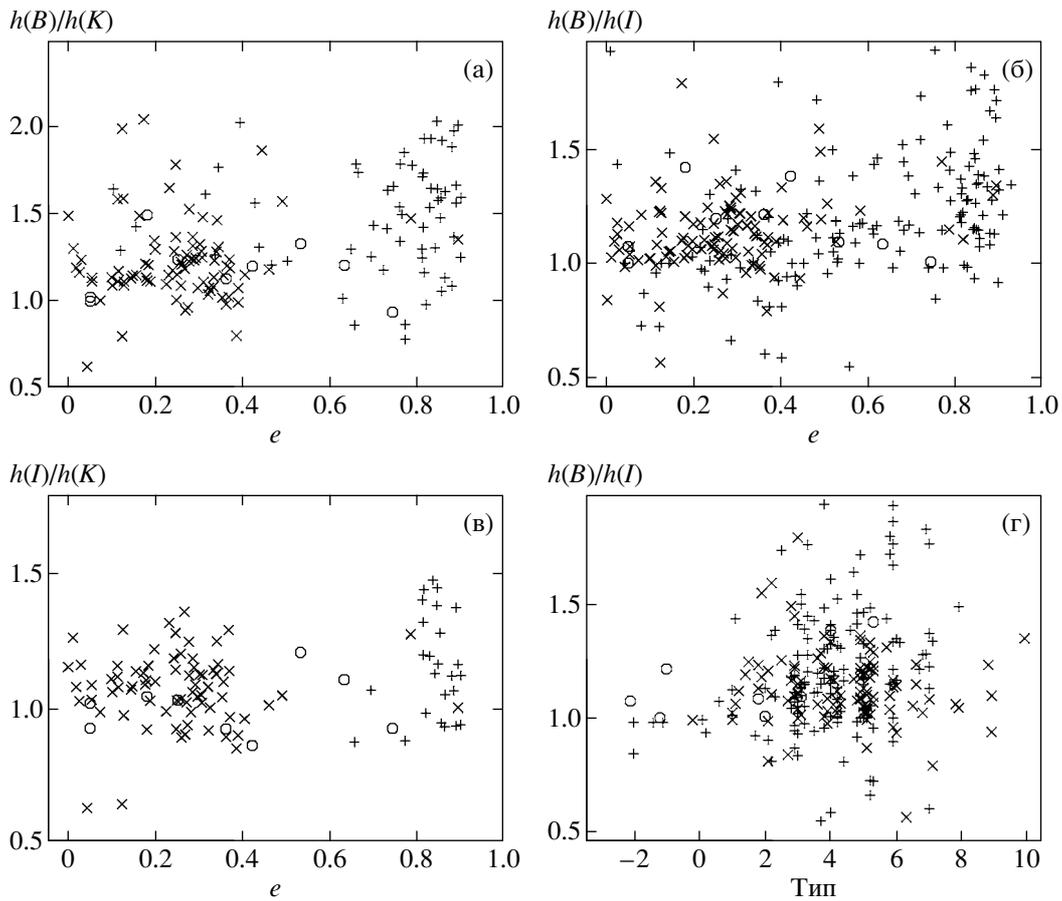
График зависимости  $h(I)/R_{25}$  от типа галактики (рис. 6г) выглядит более информативным, чем график, представленный на рис. 6в. Наблюдается явная зависимость: чем более поздним является морфологический тип галактики, тем больше в среднем относительный размер ее диска. Для S0-галактик характерное значение  $h(I)/R_{25} \approx 0.15–0.20$ , для Sd-Irr-галактик —  $0.35–0.40$ . Похожие зависимости наблюдаются и для относительных размеров

дисков, измеренных в других фотометрических полосах.

Таким образом, для изученной выборки галактик при переходе от более ранних к поздним морфологическим типам относительный размер дисков увеличивается, цвет становится более голубым, а центральная поверхностная яркость в полосе  $K$  падает.

#### 3.4. Отношения линейных шкал дисков, измеренных в различных фотометрических полосах

Параметр  $h(X)/h(Y)$ , где  $X$  и  $Y$  — фотометрические полосы, является наиболее чувствительным к присутствию пыли, и зависимость  $h(X)/h(Y)$  от эллиптичности  $e$  служит основным наблюдательным материалом для определения параметров пылевого диска в галактиках [10]. Средние значения  $h(X)/h(Y)$  для используемых выборок галактик приведены в табл. 5.



**Рис. 7.** Зависимости отношений радиальных шкал дисков  $h(B)/h(K)$  (а),  $h(B)/h(I)$  (б, г) и  $h(I)/h(K)$  (в) от эллиптичности изофот  $e$  (а–в) и типа галактики (г). Обозначения — те же, что на рис. 1б.

Во Введении было показано, что средние значения отношений шкал дисков сильно различаются у разных авторов. Существуют также противоречивые данные о зависимости  $h(X)/h(Y)$  от эллиптичности  $e$ . Построив общую выборку, мы получили относительно небольшие средние значения  $h(X)/h(Y)$  (табл. 5). Величины  $\langle h(B)/h(I) \rangle$  и  $\langle h(B)/h(K) \rangle$  соответствуют оценкам [8, 14] для значений соответствующих параметров в случае влияния исключительно градиента возраста и металличности вдоль радиуса. По нашему мнению, большой разброс средних значений  $h(X)/h(Y)$ , полученных в ранних работах, вызван широким диапазоном наблюдаемых значений  $h(X)/h(Y)$  (рис. 7а, 7г).

Зависимости  $h(X)/h(Y)$  от типа галактик в полосах  $BIK$  исследовались ранее в работе [14]. Представленная нами на рис. 7г зависимость  $h(B)/h(I)$  от морфологического типа галактики повторяет данные [14]: отношение  $h(B)/h(I) = 1.0–1.2$  для S0-галактик, минимальные значения  $h(B)/h(I) = 1.0$  характерны для галактик всех

типов, а максимальные — возрастают от 1.2–1.4 для Sa-галактик до 1.6–1.9 для Sc–Sd-галактик.

Зависимости  $h(B)/h(K)$ ,  $h(B)/h(I)$  и  $h(I)/h(K)$  от эллиптичности  $e$  представлены соответственно на рис. 7а, 7б, 7в. Как видно из рисунков, диапазон значений отношений линейных шкал диска достаточно велик, причем минимальные значения  $h(B)/h(K)$ ,  $h(B)/h(I)$  и  $h(I)/h(K)$  равны единице для галактик с любым наклоном диска, а максимальные — растут с увеличением наклона ( $h(B)/h(K)$  — от 1.4 до 2.0,  $h(B)/h(I)$  — от 1.2 до 1.8,  $h(I)/h(K)$  — от 1.2 до 1.4). Отметим, что значения  $h(I)/h(K)$  очень слабо растут с увеличением наклона диска. Для выборки 144 галактик мы получили следующие зависимости:  $h(B)/h(I) = (1.07 \pm 0.03) + (0.24 \pm 0.09)e$  и  $h(I)/h(K) = (1.07 \pm 0.03) + (0.02 \pm 0.10)e$ . Для зависимости  $h(B)/h(K)$  от эллиптичности  $e$  коэффициенты регрессии определяются с очень большой погрешностью. Для выборки 392 галактик коэффициенты при  $e$  в уравнениях оказались систематически большими:  $0.40 \pm 0.08$  для  $h(B)/h(K)$ ,  $0.33 \pm 0.05$  для  $h(B)/h(I)$  и  $0.12 \pm 0.05$

**Таблица 5.** Отношения шкал дисков в различных фотометрических полосах

Фильтр	Выборка 392 галактик	Выборка 144 галактик	Выборка 9 галактик
$X/R$	$h(X)/h(R)$		
$U/R$	$1.18 \pm 0.21$	$1.18 \pm 0.21$	$1.52 \pm 0.45$
$B/R$	$1.11 \pm 0.15$	$1.09 \pm 0.12$	$1.14 \pm 0.11$
$V/R$	$1.03 \pm 0.09$	$1.02 \pm 0.06$	$1.04 \pm 0.04$
$I/R$	$0.96 \pm 0.11$	$0.97 \pm 0.08$	$0.99 \pm 0.07$
$J/R$	—	—	$0.98 \pm 0.09$
$H/R$	$0.89 \pm 0.10$	$0.97 \pm 0.36$	$0.96 \pm 0.08$
$K/R$	$0.87 \pm 0.13$	$0.91 \pm 0.14$	$0.99 \pm 0.13$
$X/I$	$h(X)/h(I)$		
$U/I$	$1.23 \pm 0.23$	$1.23 \pm 0.23$	$1.51 \pm 0.38$
$B/I$	$1.17 \pm 0.24$	$1.14 \pm 0.16$	$1.16 \pm 0.15$
$V/I$	$1.07 \pm 0.15$	$1.05 \pm 0.10$	$1.06 \pm 0.10$
$R/I$	$1.05 \pm 0.12$	$1.03 \pm 0.08$	$1.02 \pm 0.07$
$J/I$	—	—	$0.99 \pm 0.08$
$H/I$	$0.95 \pm 0.10$	$0.95 \pm 0.10$	$0.97 \pm 0.07$
$K/I$	$0.93 \pm 0.15$	$0.93 \pm 0.17$	$1.01 \pm 0.10$
$X/K$	$h(X)/h(K)$		
$U/K$	—	—	$1.51 \pm 0.38$
$B/K$	$1.33 \pm 0.30$	$1.22 \pm 0.23$	$1.45 \pm 0.32$
$V/K$	$1.13 \pm 0.16$	$1.17 \pm 0.37$	$1.17 \pm 0.17$
$R/K$	$1.17 \pm 0.18$	$1.14 \pm 0.30$	$1.06 \pm 0.16$
$I/K$	$1.10 \pm 0.18$	$1.12 \pm 0.32$	$1.02 \pm 0.14$
$J/K$	—	—	$1.00 \pm 0.10$
$H/K$	$0.99 \pm 0.09$	$1.04 \pm 0.33$	$0.97 \pm 0.06$

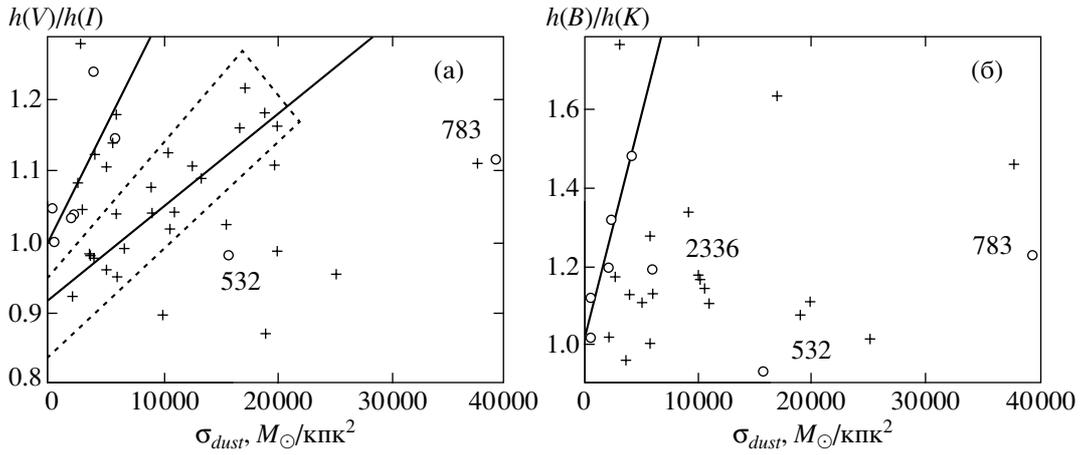
для  $h(I)/h(K)$ . Это связано с тем, что галактики с  $e > 0.6$  изучались в основном в трех работах [1, 8, 14] с использованием одномерной декомпозиции галактик на балдж и диск. Несколько объектов с  $e > 0.6$ , параметры дисков в которых были получены с помощью двумерной декомпозиции, имеют меньшие значения  $h(X)/h(Y)$  (рис. 7а–в).

Отмеченная в работе [10] корреляция между  $h(B)/h(I)$  и линейной шкалой падения яркости диска  $h(I)$  в целом подтверждается. Большие диски имеют в среднем более высокие значения  $h(B)/h(I)$ . Однако разброс данных очень велик: для галактик с  $h(I) \approx 1$  кпк значения  $h(B)/h(I) = 0.9 - 1.4$ , а для галактик с  $h(I) \approx 8$  кпк значения

$h(B)/h(I) = 1.0 - 1.7$ . Вероятно, данная зависимость является следствием того, что как величина  $h(I)$ , так и отношение  $h(B)/h(I)$  в среднем растут от галактик ранних к галактикам поздних типов.

Куноу [10] построила модельные сетки на графике  $h(B)/h(I)$  от эллиптичности  $e$  в зависимости от параметров пылевого диска  $\tau_0$  и  $h_{disk}/h_{dust}$ , а также параметра  $h(B)/h(I)$ , характеризующего радиальные изменения в составе звездного населения диска. Полученные нами значения  $h(B)/h(I)$  для галактик с различным  $e$  (рис. 7б) покрывают весь диапазон моделей, рассмотренных в [10]. Таким образом, данные свидетельствуют о том, что в галактиках всех типов наблюдаются различные радиальные изменения в составе звездного населения диска и широкий диапазон параметров пылевого диска. Можно указать только на общую тенденцию увеличения вклада пыли и увеличения радиального градиента возраста и металличности при переходе от галактик более ранних к галактикам более поздних типов.

Мы попытались рассмотреть зависимость между значениями  $h(V)/h(I)$ ,  $h(B)/h(K)$  и средней поверхностной плотностью пыли  $\langle \sigma_{dust} \rangle$ . Для этого мы воспользовались результатами работы [18], в которой имеются данные по массе пыли (определенной по светимости галактик в дальнем ИК-диапазоне) в 37 галактиках из нашей выборки 144 галактик. Кроме этого, были использованы данные по массе пыли в 8 галактиках (всех, кроме NGC 1138), параметры дисков которых были получены нами. Средняя поверхностная плотность пыли рассчитывалась по формуле:  $\langle \sigma_{dust} \rangle = \frac{M_{dust}}{\pi R_{25}^2 (1-e)}$ . Полученные графики представлены на рис. 8а, 8б. Построить однозначную зависимость между отношением шкал дисков и средней поверхностной плотностью пыли нельзя. Имеется большое количество галактик с большой плотностью пыли, диски которых имеют относительно небольшие значения  $h(V)/h(I)$  и  $h(B)/h(K)$  (рис. 8а, 8б). По данным для 6 галактик нашей выборки (кроме NGC 532 и NGC 783) и 7 галактик с небольшими значениями  $\langle \sigma_{dust} \rangle$  из общей выборки удаётся построить зависимость  $h(V)/h(I) = (1.00 \pm 0.04) + (3.2 \pm 1.4) \times 10^{-5} \langle \sigma_{dust} \rangle$  ( $r = 0.76$ ), где  $\sigma_{dust}$  имеет размерность  $M_{\odot}/\text{кпк}^2$ . Большинство галактик общей выборки удовлетворяют зависимости  $h(V)/h(I) = (0.92 \pm 0.02) + (1.3 \pm 0.1) \times 10^{-5} \langle \sigma_{dust} \rangle$  с коэффициентом корреляции  $r = 0.94$  (рис. 8а); такие галактики находятся на рисунке в области, выделенной пунктирными линиями. Величина  $h(B)/h(K)$  коррелирует с  $\langle \sigma_{dust} \rangle$  еще хуже: лишь для 5 галактик нашей выборки (кроме NGC 532, NGC 783 и NGC 2336) можно построить зависимость  $h(B)/h(K) = (1.02 \pm$



**Рис. 8.** Зависимости отношений радиальных шкал дисков  $h(V)/h(I)$  (а) и  $h(B)/h(K)$  (б) от средней поверхностной плотности пыли ( $\sigma_{dust}$ ). Кружки — объекты выборки 9 галактик, прямые крестики — объекты выборки 37 галактик. Объяснение прямых сплошных линий и пунктирной линии см. в тексте. На графике приведены номера галактик NGC.

$\pm 0.04) + (11.6 \pm 1.8) \times 10^{-5} \langle \sigma_{dust} \rangle$  с коэффициентом корреляции  $r = 0.96$  (рис. 8б). Почему многие галактики с большим количеством пыли имеют небольшие значения  $h(V)/h(I)$  и  $h(B)/h(K)$ ? Причина этого нам видится в следующем: рассчитывая из наблюдений интегральную массу пыли в галактиках, мы не разделяем вклад пыли, образующей экспоненциальный диск, и пыли, концентрирующейся к спиральным ветвям и барам. В частности, галактика NGC 4136, изучавшаяся нами, имеет наибольшие значения  $h(V)/h(I)$  и  $h(B)/h(K)$ . Пыль в этой галактике сконцентрирована в диске [16]. В то же время, галактики NGC 532, NGC 783 и NGC 2336, более богатые пылью, имеют относительно небольшие значения  $h(V)/h(I)$  и  $h(B)/h(K)$ . Это связано с тем, что большое количество пыли в них сконцентрировано в виде полос вдоль внутренних кромок спиральных ветвей [6].

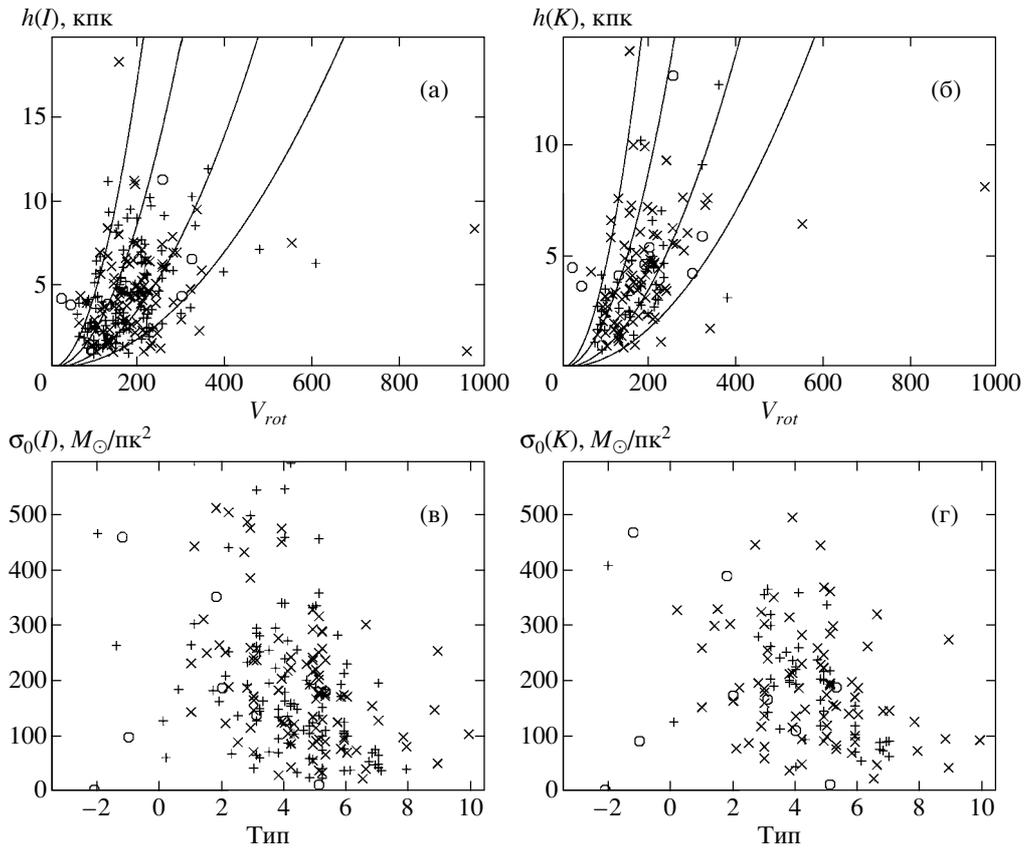
### 3.5. Оценка центральной поверхностной плотности и отношения масса/светимость диска

Для классических тонких экспоненциальных дисков существует зависимость между их центральной поверхностной плотностью  $\sigma_0$ , линейной шкалой падения яркости  $h$  и максимальной скоростью вращения диска  $V_{disk}$ :  $\sigma_0 \approx 0.044 V_{disk}^2 / h$ , где  $\sigma_0$  измеряется в  $M_{\odot}/\text{pk}^2$ ,  $V_{disk}$  — в км/с,  $h$  — в кпк. При этом  $V_{disk} = (0.6 - 0.8) V_{rot}$  (в зависимости от модели галактики), где  $V_{rot}$  — максимальная скорость вращения галактики, определяемая из наблюдений. Таким образом,  $\sigma_0 \approx 0.022 V_{rot}^2 / h$ . Графики зависимости  $h(I)$  и  $h(K)$  от  $V_{rot}$  приведены на рис. 9а и 9б, соответственно.

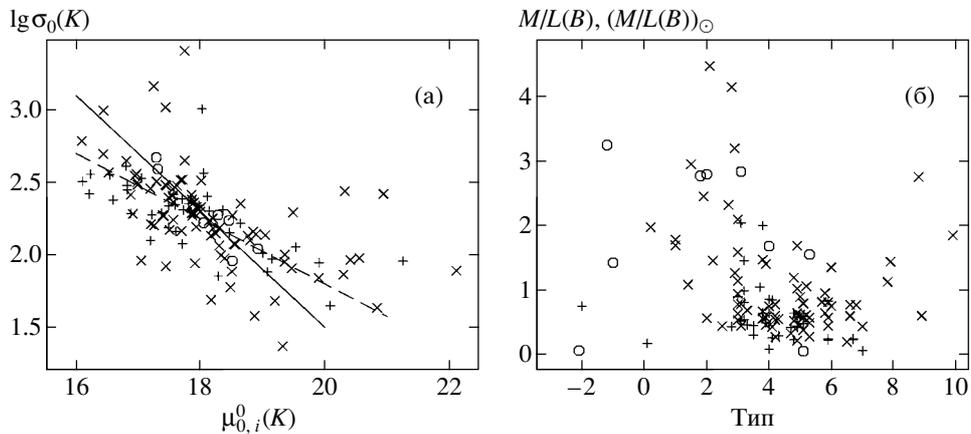
Центральная поверхностная плотность диска большинства галактик лежит в пределах от 50 до

$500 M_{\odot}/\text{pk}^2$ , причем значения  $\sigma_0$ , определенные по зависимости  $h(K)$  от  $V_{rot}$ , распределены более компактно (рис. 9б). Наблюдается слабая корреляция между значениями  $\sigma_0(I)$ ,  $\sigma_0(K)$  и типом галактики: в среднем галактики более ранних типов имеют большую  $\sigma_0$  (рис. 9в, 9г). Это согласуется с зависимостью, полученной для величины центральной поверхностной яркости диска от типа в полосе  $K$  (рис. 2д).

Величины  $\mu_{0,i}^0(K)$  и  $\sigma_0(K)$  для дисков галактик достаточно хорошо коррелируют друг с другом (рис. 10а). По значению  $\mu_{0,i}^0(K)$  можно с точностью  $\pm 50\%$  оценить  $\sigma_0(K)$ . Для величин  $\mu_{0,i}^0$  и  $\sigma_0$ , измеренных в других фотометрических полосах, наблюдается менее четкая корреляция. Данные нашей выборки 9 галактик соответствуют зависимости  $\lg \sigma_0(K) [M_{\odot}/\text{pk}^2] = -0.4 \mu_{0,i}^0(K) + 9.5$  ( $|r| = 0.30$ ) или  $\sigma_0(K) = 10^{0.4(23.75 - \mu_{0,i}^0(K))} \approx 0.36 (M/L(K))_{\odot}$  (рис. 10а). Данные общей выборки 392 галактик, однако, удовлетворяют зависимости  $\lg \sigma_0(K) \sim -0.225 \mu_{0,i}^0(K)$ , что говорит о наличии зависимости предельного значения отношения  $M/L$  от  $\mu_{0,i}^0$ . Для галактик с высокой центральной поверхностной яркостью диска величина  $M/L \leq 0.9 (M/L)_{\odot}$  в  $K$ , а для галактик с низкой центральной поверхностной яркостью диска —  $M/L \leq 0.15 (M/L)_{\odot}$  в  $K$ . Похожую зависимость между отношением  $\langle M/L(K) \rangle$  диска и ИК-светимостью галактики  $M_K$  обнаружили авторы [22]:  $\lg(M/L(K)) \sim -0.08 M_K$ . Модельные расчеты [23] предсказывают зависимость  $\lg(M/L(K)) \sim -0.05 \mu_{0,i}^0(K)$ , где  $M/L(K)$  — отношение масса/светимость для диска в целом, а  $\mu_{0,i}^0(K)$  — центральная поверхностная



**Рис. 9.** Зависимости радиальной шкалы падения яркости дисков  $h$  в полосах  $I$  (а) и  $K$  (б) от максимальной скорости вращения галактики  $V_{rot}$  и зависимости центральной поверхностной плотности диска  $\sigma_0$ , полученной с использованием данных  $h(I)$  (в) и  $h(K)$  (г), от типа галактики. Обозначения — те же, что на рис. 16. На графиках (а) и (б) показаны кривые, соответствующие центральной поверхностной плотности дисков  $\sigma_0 = 50, 100, 250$  и  $500 M_\odot/\text{pk}^2$  (слева направо).



**Рис. 10.** Зависимость логарифма центральной поверхностной плотности диска  $\lg \sigma_0(K)$  от центральной поверхностной яркости диска  $\mu_{0,i}^0(K)$  (а) и зависимость отношения  $M/L(B)$  в центре диска от типа галактики (б). Обозначения — те же, что на рис. 16. На графике (а) сплошной линией показана зависимость для объектов из выборки 9 галактик, пунктирной — для объектов из выборки 392 галактик (см. текст).

яркость звездного населения диска. Отметим, что усредненные по диску значения  $\langle M/L(K) \rangle$  равны  $0.7$  согласно наблюдательным данным [24]

и  $1.0 \pm 0.4$  согласно наблюдательным данным [22], однако модельные расчеты [23] дают более низкие значения:  $\langle M/L(K) \rangle = 0.5 \pm 0.2$ .

По отношению величины центральной поверхностной плотности диска  $\sigma_0(K)$  к центральной поверхностной яркости  $\mu_{0,i}^0$  в полосе  $B$  мы попытались оценить отношение масса/светимость  $M/L(B)$  в центре диска (рис. 10б). Такой метод оценки  $M/L(B)$  является весьма косвенным и сильно зависит от модельных параметров диска, поэтому наши результаты носят качественный характер. Отношение  $M/L(B)$ , как видно из графика на рис. 10б, уменьшается от галактик ранних типов к галактикам поздних типов. Для первых характерны значения  $M/L(B) = 1.5 - 3(M/L(B))_{\odot}$ , в большинстве спиральных галактик —  $M/L(B) = 0.3 - 1(M/L(B))_{\odot}$ . Прослеживается четкая корреляция максимальных значений  $M/L(B)$  от типа для Sb—Sd-галактик (рис. 10б).

Представляет интерес зависимость центральной поверхностной яркости диска  $\mu_{0,i}^0(I)$  от его линейных размеров  $h(I)$  (рис. 11). Распределение галактик на графике имеет четкую нижнюю границу. Для галактик с большими дисками ( $h(I) > 5$  кпк) граница связана с предельными наблюдаемыми интегральными светимостями дисков  $L(I) \approx 10^{11} L(I)_{\odot}$  (линии одинаковой светимости дисков соответствуют на графике функции  $\mu \sim \sim 5 \lg h$ ). Для галактик с небольшими дисками ( $h(I) < 5$  кпк) их общая светимость не достигает значений  $10^{11} L(I)_{\odot}$ ; основным ограничением служит предельная центральная поверхностная плотность диска ( $\approx 500 M_{\odot}/\text{пк}^2$ ).

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наиболее интригующим результатом, полученным нами, является уменьшение центральной поверхностной яркости дисков галактик поздних типов в ИК-диапазоне при постоянстве величины  $\mu_{0,i}^0(B)$  вдоль хаббловской последовательности. Подобные результаты получали ранее Пелетье и др. [8] и де Грииз [14]. Авторы [8] объясняют подобные зависимости тем, что диски в центре галактик являются оптически толстыми в  $B$ -полосе, но оптически тонкими в  $K$ -полосе. По нашему мнению, данная интерпретация не объясняет зависимости  $\mu_{0,i}^0(K)$  от типа галактики и постоянства значений  $\mu_{0,i}^0(B)$  вдоль хаббловской последовательности. Если мы будем считать, что распределение пыли соответствует распределению плотности звездно-газового диска в галактике, и воспользуемся моделью “пыли, равномерно перемешанной в звездно-газовой среде” (что более правильно, чем использование модели “пылевого экрана”, так как вертикальная шкала  $z$  падения плотности пылевого диска равна по порядку

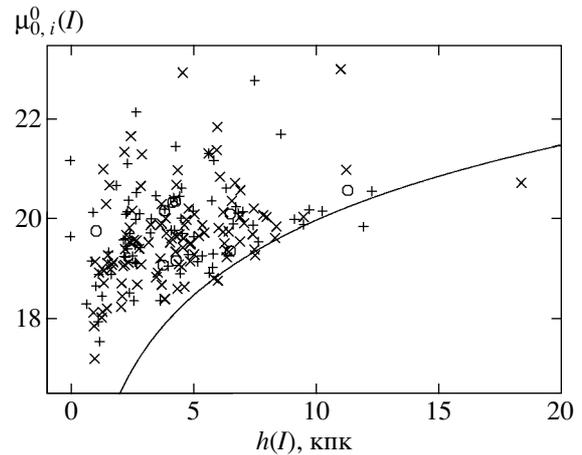


Рис. 11. Зависимость между центральной поверхностной яркостью диска  $\mu_{0,i}^0(I)$  и его радиальной шкалой падения яркости  $h(I)$ . Обозначения — те же, что на рис. 16. Кривая соответствует общей светимости диска  $L(I) \approx 10^{11} L(I)_{\odot}$ .

величины вертикальной шкале плотности звездно-газового диска [4, 10]), которая дает величину поглощения  $A_{\lambda} = -2.5 \lg \frac{1 - \exp(-\tau_{\lambda})}{\tau_{\lambda}}$ , то объяснить ни постоянство величины  $\mu_{0,i}^0(B)$ , ни изменение значений  $\mu_{0,i}^0(K)$  вдоль хаббловской последовательности оказывается невозможным.

Мы предлагаем следующую интерпретацию зависимости  $\mu_{0,i}^0(K)$  от типа галактики при постоянстве значений  $\mu_{0,i}^0(B)$ . Поверхностная яркость  $\mu_{0,i}^0(K)$  в центре диска реально уменьшается вдоль хаббловской последовательности (по крайней мере, начиная с галактик типа Sc). На это указывают полученные косвенным, но независимым путем оценки центральной поверхностной плотности диска  $\sigma_0(K)$ . Мы предполагаем, что объемная центральная плотность диска  $\rho_0$  не зависит от типа галактики, а изменение величин  $\sigma_0(K)$  и  $\mu_{0,i}^0(K)$  вдоль хаббловской последовательности объясняется тем, что диски галактик ранних типов являются более “толстыми” (имеющими относительно большие значения  $z$ ) в центре, чем диски галактик поздних типов. В полосе  $B$  основной вклад в излучение вносят более молодые звезды, распределение которых вдоль полярной оси приблизительно одинаково для галактик всех типов. Для проверки данной гипотезы необходимы дополнительные наблюдения галактик различных типов, видимых “с ребра”, в частности, исследование зависимости  $z(B)/z(K)$  для диска. Отметим, что существование вертикального градиента цвета в спиральных галактиках (объясняемого градиентом металличности) обсуждалось в [25].

Возможна и другая интерпретация: менее плотные диски галактик поздних типов компенсируют яркость в центре более интенсивным звездообразованием (т.е. имеют более низкие значения  $M/L(B)$  по сравнению с галактиками ранних типов). Данная интерпретация не объясняет, однако, физическую природу постоянства значений  $\mu_{0,i}^0(B)$ .

На рис. 3г было показано, что величина  $\Delta(B - V)_{0,i} = (B - V)_{0,i}^{R_{25}} - (B - V)_{0,i}^0$  не зависит от типа галактики. Это является следствием независимости величины  $\mu_{0,i}^0(B)$  от типа и определения параметра  $R_{25}$  — радиуса галактики — по изофоте  $25^m$ /кв. сек. дуги в  $B$ . В связи с тем, что величина  $h/R_{25}$  растет при переходе от галактик ранних типов к галактикам поздних типов (рис. 6г), градиент цвета, нормированный на единицу шкалы диска  $h$ , растет вдоль хаббловской последовательности. Независимо подобный результат получается из зависимости  $h(X)/h(Y)$  от типа (рис. 7г) и анализа двухцветных диаграмм (рис. 4а, 4в, 5).

Свойства пылевых дисков и радиальные изменения в составе звездного населения достаточно сильно отличаются друг от друга в разных галактиках. Поэтому построить однозначную зависимость между величиной  $h(X)/h(Y)$  и значением эллиптичности изофот  $e$ , как это сделано в работе [1], не представляется возможным. Средние значения  $h(X)/h(Y)$ , полученные нами, соответствуют оценкам [8, 14] для значений  $h(X)/h(Y)$  в случае влияния на параметры лишь радиального градиента возраста и металличности. Полученные для выборки 392 галактик результаты хорошо согласуются с данными [3–5, 7, 8, 13]. Авторы [10, 14] получили более высокие значения  $\langle h(X)/h(Y) \rangle$ . Присутствие пыли оказывает значительное влияние на значения  $h(X)/h(Y)$  и характер зависимости  $h(X)/h(Y)$  от эллиптичности  $e$ , однако найти строгую корреляцию между отношением шкал дисков и средней поверхностной плотностью пыли нам не удалось. Это связано с тем, что мы не можем, зная общую массу пыли, разделить вклад пыли, образующей экспоненциальный диск, и пыли, концентрирующейся к спиральным ветвям и барам. Пыль, сконцентрированная вдоль спиральных рукавов и баров галактик, не влияет на значения  $h(X)/h(Y)$ .

## 5. ВЫВОДЫ

1. При переходе от галактик ранних типов к галактикам поздних типов центральная поверхностная яркость в фильтре  $K$  и центральная поверхностная плотность их дисков падают, интегральные и центральные показатели цвета и отношение

масса/светимость  $M/L(B)$  в центре уменьшаются, относительный размер диска  $h/R_{25}$  и отношение  $h(X)/h(Y)$  растут (здесь  $X$  — более коротковолновая фотометрическая полоса, чем  $Y$ ). Градиент цвета (при нормировке на  $R_{25}$ ) и “голубая” центральная поверхностная яркость  $\mu_{0,i}^0(B)$  не зависят от типа галактики. Диски галактик ранних типов оказываются более плотными в центре и более короткими, чем диски галактик поздних типов. Средний возраст звезд в дисках галактик ранних типов больше, а линейный градиент возраста и металличности — меньше, чем в галактиках поздних типов. При переходе к галактикам поздних типов увеличивается влияние пыли на фотометрические параметры дисков и галактик в целом.

2. Диски S0-галактик являются более однородными по своим параметрам, чем диски спиральных галактик. Это можно объяснить меньшим линейным градиентом возраста и металличности звездного населения и меньшим количеством пыли в дисках S0-галактик. Резкой границы в свойствах дисков линзовидных, спиральных и неправильных галактик не обнаружено — все параметры плавно меняются вдоль хаббловской последовательности.

3. Центральная поверхностная яркость дисков во всех фотометрических полосах увеличивается с ростом общей светимости родительской галактики.

4. Отношение линейных шкал дисков, измеренных в различных фотометрических полосах,  $h(X)/h(Y)$  растет с увеличением значения эллиптичности изофот диска  $e$  (наклона галактики), однако диапазон значений  $h(X)/h(Y)$  для каждого конкретного значения  $e$  больше, чем градиент изменения значений параметра  $h(X)/h(Y)$  по  $e$ . Это связано с тем, что в галактиках наблюдается очень широкий диапазон радиальных изменений в составе звездного населения диска и параметров пылевого диска.

5. Полагая, что распределение поверхностной плотности в диске соответствует распределению поверхностной яркости в полосе  $K$ , для определения линейной шкалы падения поверхностной плотности  $h(\sigma)$  с точностью  $\pm 15\%$  можно использовать зависимость  $h(\sigma) = h(I)/(1.07 + 0.02e)$ .

Автор благодарит А.В. Засова (ГАИШ) за плодотворное обсуждение работы и С.С. Кайсина (САО РАН) за наблюдения галактик NGC 4136 и NGC 5351. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 04-02-16518, 05-02-16454 и 06-02-16857).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Cunow, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **129**, 593 (1998).

2. R. E. de Souza, D. A. Gadotti, and S. dos Anjos, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **153**, 411 (2004).
3. R. S. de Jong, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **118**, 557 (1996).
4. E. M. Xilouris, Y. I. Byun, N. D. Kylafis, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **344**, 868 (1999).
5. C. Mollenhoff, *Astron. and Astrophys.* **415**, 63 (2004).
6. A. С. Гусев, *Астрон. журн.* **83**, 195 (2006).
7. D. M. Elmegreen and B. G. Elmegreen, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **54**, 127 (1984).
8. R. F. Peletier, E. A. Valentijn, A. F. M. Moorwood, and W. Freudling, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **108**, 621 (1994).
9. M. Balcells and R. F. Peletier, *Astron. J.* **107**, 135 (1994).
10. B. Cunow, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **323**, 130 (2001).
11. W. van Driel, E. A. Valentijn, P. R. Wesselius, and D. Kussendragger, *Astron. and Astrophys.* **298**, L41 (1995).
12. E. Xanthopoulos, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **280**, 6 (1996).
13. L. A. MacArthur, S. Courteau, E. Bell, and J. A. Holtzman, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **152**, 175 (2004).
14. R. de Grijs, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **299**, 595 (1998).
15. A. S. Gusev and M.-G. Park, *Astron. and Astrophys.* **410**, 117 (2003).
16. A. С. Гусев, А. В. Засов, С. С. Кайсин, *Письма в "Астрон. журн."* **29**, 414 (2003).
17. A. С. Гусев, С. С. Кайсин, *Астрон. журн.* **81**, 611 (2004).
18. D. Bettoni, G. Galletta, and S. Garcia-Burillo, *Astron. and Astrophys.* **405**, 5 (2003).
19. T. X. Thuan and M. Sauvage, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **92**, 749 (1992).
20. R. Buta and K. L. Williams, *Astron. J.* **109**, 543 (1995).
21. G. D. Bothun and M. D. Gregg, *Astrophys. J.* **350**, 73 (1990).
22. G. Moriondo, C. Giovanardi, and L. K. Hunt, *Astron. and Astrophys.* **339**, 409 (1998).
23. E. F. Bell and R. S. de Jong, *Astrophys. J.* **550**, 212 (2001).
24. P. J. Grosbol and P. A. Patsis, *Astron. and Astrophys.* **336**, 840 (1998).
25. R. F. Peletier and R. de Grijs, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **300**, L3 (1998).

## PROPERTIES OF GALACTIC DISKS AT OPTICAL AND NEAR-IR WAVELENGTHS

A. S. Gusev

We have analyzed the radial scales, central surface brightnesses, and colors of 400 disks of various types of galaxies. For nine galaxies, the scale for the brightness decrease and the scale for the central disk brightness were obtained via a two-dimensional decomposition of the *UBVRIJHK* photometric images into bulge and disk components. We used published disk parameters for 392 of the galaxies. The central surface brightness  $\mu_{0,i}^0$  and linear scale for the brightness decrease  $h$  vary smoothly along the Hubble sequence of galaxies within a rather narrow interval. The disks of relatively early-type galaxies display higher central *K* surface brightnesses, higher central surface densities, higher central mass-to-luminosity ratios  $M/L(B)$ , smaller sizes (relative to the diameter of the galaxy  $D_{25}$ ), redder integrated colors, and redder central colors. The color gradient normalized to the radius of the galaxy and the "blue" central surface brightness of the disk,  $\mu_{0,i}^0(B)$ , are both independent of the galaxy type. The radial disk scales in different photometric bands differ less in early-type than in late-type galaxies. A correlation between the central disk surface brightness and the total luminosity of the galaxy is observed. We also consider the influence of dust on the photometric parameters of the disks.