

УДК 524.7:520.82

## ИЗУЧЕНИЕ ГАЛАКТИК В ВОЙДЕ LYNX–CANCER. IV. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

© 2014 Ю. А. Перепелицына<sup>1\*</sup>, С. А. Пустильник<sup>1</sup>, А. Ю. Князев<sup>2,3,4</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>2</sup>Южноафриканская астрономическая обсерватория, Кейптаун, 7935 ЮАР<sup>3</sup>Южноафриканский большой телескоп, Кейптаун, 7935 ЮАР<sup>4</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

Поступила в редакцию 13 декабря 2013 года; принята в печать 14 мая 2014 года

В работе представлены результаты фотометрического изучения 85-ти объектов из обновленной выборки галактик в близком войде Lynx–Cancer. Для фотометрии использованы изображения из базы данных Слоуновского обзора в фильтрах  $u, g, r, i$ . Получены модельно-независимые параметры галактик, такие как интегральные звездные величины и цвета, эффективные радиусы и соответствующие поверхностные яркости, оптические радиусы и радиусы Холмберга. По результатам анализа радиальных профилей поверхностной яркости получены их значения в центре и масштабные длины модельных дисков. Изучены и сопоставлены с модельными эволюционными треками пакета PEGASE 2 цвета внешних частей галактик. Это позволило получить оценки времени от начала звездообразования  $T_{SF}$ , которые для подавляющего числа исследованных галактик оказываются порядка космологического времени  $T_0$ . Однако, для 13-ти объектов выборки  $T_{SF}$  не превышают  $T_0/2 \sim \sim 7$  Гуг, а для 7-ми из них  $T_{SF} \lesssim 3.5$  Гуг. Среди последних в основном представлены эволюционно-молодые объекты и доминируют объекты низких светимостей с  $M_B > -13.2$ . Интегральные звездные величины и цвета использованы для оценки массы звезд галактик. Для галактик войда с доступными потоками в линии HI получен параметр  $\mathfrak{M}(HI)/L_B$  и оценка массовой доли газа. Небольшая подгруппа наиболее богатых газом галактик войда (примерно 10%) с величиной  $\mathfrak{M}(HI)/L_B \gtrsim 2.5$  имеет массовую долю газа, достигающую (94–99)%. Многие из них показывают нетипично голубые цвета внешних областей. Для проверки возможных статистических различий свойств галактик войда и галактик выборки, сформированных по более общим критериям, проведено сравнение некоторых их параметров с аналогичными данными для выборки 195 галактик из Equatorial Survey (ES), полученной по части слепого HI-обзора HIPASS. В общем диапазоне светимостей  $-18.5 < M_g < -13.5$  свойства сравниваемых выборок достаточно близки. Для наиболее слабых галактик войда наблюдаются отличия от галактик обзора ES. Однако и в ES обзоре имеется порядка 7% слабых, так называемых «рудиментарных», галактик с повышенным отношением  $\mathfrak{M}(HI)/L_B$ , большая часть которых находится далеко от массивных соседей и, вероятно, являются аналогами галактик войдов.

Ключевые слова: галактики: фотометрия — галактики: фундаментальные параметры — галактики: эволюция

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Пустоты (или войды) в крупномасштабном распределении галактик открыты более 30-ти лет назад (например, [1, 2]). Наблюдательно они обычно определяются как области, лишенные галактик нормальной и высокой светимости:  $M_B \geq -20$ , что соответствует излому функции светимости галактик (например, [3]). Войды занимают более половины объема современной Вселенной. При

этом число галактик в них не превышает порядка 20% от общего количества каталогизированных, что отражает значительно пониженную плотность материи в них. В численных моделях эволюции материи в горячей Вселенной с темной материей (DM) войды возникают как естественные структуры и в целом неплохо напоминают наблюдаемые. Однако сравнение предсказываемого числа гравитационно-связанных гало DM и числа наблюдаемых галактик в войдах обнаруживает недостаток последних в несколько раз. Причина этого феномена, сформулированного в разной форме в

\*E-mail: jlyamina@yandex.ru

работах де Лаппаран [4], Пиблса [5], Тихонова и Клыпина [6], не ясна.

Можно надеяться, что по мере усовершенствования моделей формирования и эволюции галактик, разрыв между числом гало DM и реальными галактик уменьшится. Одной из причин упомянутого феномена может быть повышенная доля в войдах карликовых галактик низкой поверхностной яркости (LSBD), поскольку их труднее обнаруживать и отождествлять. Чтобы понять ситуацию с подобными объектами, необходимы детальные и массовые исследования свойств галактик в войдах. Авторы большинства работ в этом направлении, например [7–9], имели дело с далекими большими войдами и, вследствие естественной наблюдательной селекции, только с более яркой частью галактик войдов ( $M_r \lesssim -16.5$ ). Больших отличий от аналогичных галактик в более плотных структурах, кроме несколько более голубых цветов, для них не выявлено. В недавней работе Хойл и др. [10] по галактикам из SDSS проанализированы фотометрические свойства почти 90 000 галактик, принадлежащих примерно 1000 войдам. Аналогично обнаружено, что карлики всех типов в войдах являются систематически более голубыми по сравнению с их аналогами в более плотном окружении.

Из общих соображений и по результатам модельных расчетов наиболее значительное влияние окружения на эволюцию следует ожидать для наименее массивных галактик (например, [11]). Суммируя известные на сегодня результаты, можно ожидать, что на эволюционный статус маломассивных галактик в войдах влияют следующие причины.

(1) Формирование с заметным запаздыванием гравитационно-связанных гало DM с массами карликовых галактик в крупномасштабных структурах низкой плотности (войдах) [12] и замедленная эволюция (части) галактик войдов.

(2) Войды заполнены по большей части маломассивными галактиками. Поэтому, в соответствии с известной корреляцией между светимостью и поверхностной яркостью (например, [13]), они имеют более высокую долю LSB-галактик. Модельные расчеты взаимодействий дисковых галактик низкой и нормальной (высокой, HSB) яркости [14] при их сближениях без слияния показывают, что конечный отклик сильно отличается для двух типов галактик. В HSB-галактике происходит формирование бара и полноценная вспышка звездообразования, в то время как в LSB-галактике отклик значительно слабее, и темп звездообразования лишь незначительно увеличен. Поскольку число столкновений в войдах за время жизни галактик понижено во много раз (по сравнению с областями средней плотности), можно

ожидать существование заметной доли галактик в войдах, не испытавших «существенных» взаимодействий. Однако эти общие соображения необходимо проверить в численных моделях, учитывающих многие нюансы формирования и эволюции галактик.

(3) По результатам одного из таких модельных расчетов эволюции галактик в войдах Крекел и др. [11] обнаружили указания на их отличия от галактик в областях более высокой плотности, но только для объектов наименьших масс из того диапазона, который они моделировали (что соответствует светимостям  $M_r$  от  $-12^m$  до  $-16^m$ ).

Из вышесказанного следует, что при поиске возможных эволюционных особенностей в наименее массивных галактиках войдов для уменьшения эффектов селекции необходимо иметь дело с достаточно близкими объектами.

Первая глубокая выборка из 79-ти галактик (до  $M_B \sim -12$ ) в близком войде Lynx–Cancer была представлена в работе Пустильника и Тепляковой [15]. Результаты ее исследования указывают на то, что для таких маломассивных галактик эффект разреженного окружения действительно имеет место, проявляясь в замедленной эволюции. Согласно выводам Пустильника и др. [16], галактики войда имеют систематически пониженную металличность (в среднем на 30%). Кроме того, небольшая, но вполне значимая доля (примерно 10%) галактик войда имеет необычные свойства, характерные для эволюционно-молодых объектов [17, 18]. Следует упомянуть так называемый Void Galaxy Survey (VGS, [19]), в котором исследуются HI-структура и оптические свойства около 60-ти SDSS-галактик, расположенных вблизи центров больших, но относительно далеких (приблизительно 80 Мпк) войдов. Лишь для нескольких ближайших войдов из их выборки светимости изучаемых галактик приближаются к медианной для выборки в войде Lynx–Cancer. Именно среди таких галактик авторы [19] нашли три очень богатых газом объекта.

В этой работе мы представляем результаты фотометрического исследования галактик войда Lynx–Cancer по их изображениям в фильтрах  $u, g, r, i$  из базы данных SDSS DR7 (Sloan Digital Sky Survey Data Release 7) [20]. Цель фотометрического анализа — получить основные параметры галактик выборки для изучения статистических свойств галактик войдов и для сравнения с другими выборками похожих галактик в более плотном окружении или отобранными по другим критериям. Полные звездные величины и цветовые индексы галактик могут быть использованы для оценки массы их звезд. Кроме того, цвета внешних областей галактик, в которых обычно отсутствуют

следы текущего или недавнего звездообразования, при сопоставлении с модельными эволюционными треками используются как индикаторы возрастов наиболее старого (видимого) звездного населения. Одной из задач нашей работы является оценка этих возрастов.

## 2. ДОПОЛНЕННАЯ ВЫБОРКА ГАЛАКТИК В ВОЙДЕ LYNX–CANCER

Оригинальная выборка галактик войда Lynx–Cancer подробно описана в выборке [15]. В ней представлен список 79-ти галактик войда — односвязной области, в которой отсутствуют галактики нормальной и высокой светимости (здесь  $M_B < -19.0$ ). Войд описывается сферой радиусом 8 Мпк и прилегающими к ней областями. Галактики войда удовлетворяют условию достаточной удаленности (более 2 Мпк) от галактик ярче чем  $M_B = -19.0$ . В этой же работе обсуждается полнота выборки. На сегодня найдено более 20-ти новых галактик войда. Часть из них обнаружена благодаря программе по поиску новых LSB-карликовых галактик в этом войде, остальные — по результатам новых обзоров (в первую очередь обзора ALFALFA [24]) и детального анализа данных об уже известных галактиках в этой области неба.

Дополненная выборка галактик войда Lynx–Cancer готовится к публикации. В новую версию входит 101 галактика, 16 из которых находятся вне зоны, покрываемой полями SDSS. Наш анализ ограничен списком из 85-ти галактик, приведенным в таблице 1. Дополненная выборка принята за основу для того, чтобы изучить фотометрические свойства галактик войда с максимально возможной полнотой.

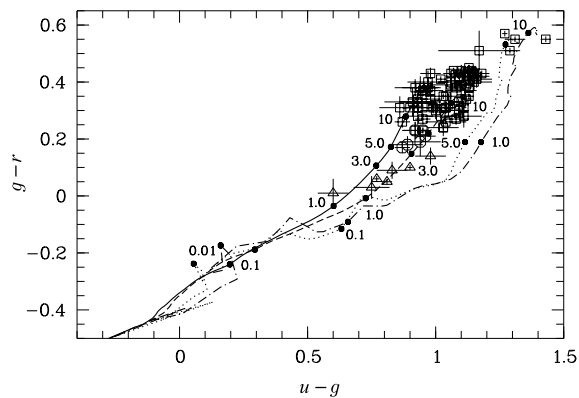
## 3. МЕТОДЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Обзор SDSS [25] представляет пользователям откалиброванные изображения высокого качества в фильтрах  $u, g, r, i, z$ . Поэтому при первичной обработке необходим лишь один дополнительный шаг — качественное вычитание фона неба. Эта процедура производилась в системе ESO-MIDAS с помощью пакета `air` подобно тому, как детально описано в работе Князева и др. [26]. Изучаемый объект закрывается маской, фон неба аппроксимируется двумерным полиномом. Полученная модель фона неба вычитается из изображения. При этом в области под маской проводится интерполяция фона из окружающей области. После этого с помощью фотометрии в круговых апертурах измеряется поток внутри маски для  $u, g, r, i$ -изображений с

вычтенным фоном. Затем полученные потоки пересчитываются в полные звездные величины галактик. Для преобразования инструментальных потоков в звездные величины мы использовали систему фотометрических коэффициентов для каждого из полей базы данных SDSS.

Для всех галактик были получены следующие модельно-независимые параметры: интегральные звездные величины в фильтрах  $u, g, r, i$ , интегральные цвета  $(u - g), (g - r), (r - i)$ , а также интегральные величины  $B_{\text{tot}}$ , пересчитанные из  $g$  и  $r$  по соотношениям, предложенным Лаптоном [27]. После создания профиля поверхностной яркости, для каждого объекта были оценены радиусы галактики  $R_{50}$  и  $R_{90}$ , внутри которых содержится 50% и 90% ее потока в фильтрах  $u, g, r, i$ . Кроме того, получены эффективные поверхностные яркости внутри  $R_{50}$ , наблюдаемое отношение малой и большой полуосей  $b/a$ , «оптический» радиус и радиус Холмберга [28] (на уровнях  $\mu(B) = 25.0$  и  $26^{\text{m}}5/\square''$  соответственно). Все полученные эффективные радиусы умножены на  $\sqrt{a/b}$ .

Приближение радиальных профилей поверхностной яркости экспоненциальным законом или законом Серсика [29] позволило определить модельные параметры центральной поверхностной яркости  $\mu_0$  в фильтрах  $u, g, r, i$ . Из  $\mu_0(g)$  и  $\mu_0(r)$  по формулам [27] пересчитана центральная поверхностная яркость  $\mu_0(B)$  в  $B$ -полосе. Оценивались также центральные поверхностные яркости в фильтрах  $u, g, r, i$  и  $B$  ( $\mu_{0,c,i}(B)$ ), скорректированные за наклон дисков галактик к лучу зрения, а также за экстинкцию в нашей Галактике согласно работе [30]. Поправка за наклон вычислялась по формуле:  $\delta\mu = -2.5 \lg(\cos i)$ , где  $i$  — угол наклона плоскости диска к лучу зрения. Для объектов с углом наклона  $i > 70^\circ$  была взята поправка  $\delta\mu = 2.5 \lg(\alpha/\alpha_z) (1 - \exp(-\text{tg}(i) \alpha/\alpha_z))$  [31], где отношение масштабных длин  $\alpha/\alpha_z$  мы берем равным 5 (следуя работе [32]). Обе поправки принимались в предположении пренебрежимо малого поглощения в галактиках. Угол  $i$  вычислялся по стандартному соотношению  $\cos^2 i = (p^2 - q^2)/(1 - q^2)$ , где  $p = b/a$  и  $q$  — соответственно, наблюдаемое отношение полуосей и отношение полуосей реального диска. Для сравнительно ярких галактик поздних типов  $q = 0.2$ , а для слабых объектов с  $M_B > -14.8$  типичное значение  $q$ , согласно результатам работы [33], принималось равным 0.4. Кроме того, получены оценки масштабной (характеристической) длины диска  $\alpha$  для  $u, g, r, i$ -фильтров и для индекса Серсика  $n$ .

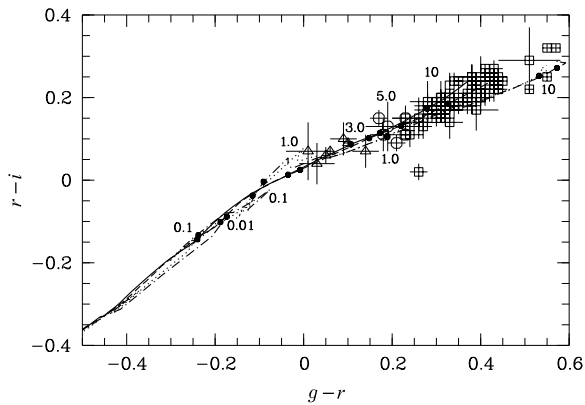


**Рис. 1.** Диаграмма  $(u-g)$  и  $(g-r)$  цветов внешних частей 85-ти галактик выборки в войде Лупх-Сансег в сравнении с эволюционными треками пакета PEGASE2 для двух крайних случаев закона звездообразования. Мгновенное (inst) SF для двух начальных функций масс (IMF): Salpeter (пунктирный трек) и Кroupa (штрих-пунктирный трек). Непрерывное (const) звездообразование для таких же IMF: Salpeter (сплошной трек) и Кroupa (штриховой трек). Светлые квадраты — цвета внешних частей галактик, соответствующие возрастам  $T \sim 10-13$  Гуг, светлые кружки —  $T \sim 4-6.5$  Гуг, светлые треугольники —  $T \sim 1-3.5$  Гуг. Цифры на треках — времена от начала звездообразования в Гуг.

### 3.1. Определение возрастов старого звездного населения

Цвета внешних частей галактик были оценены с помощью дополнительной фотометрии по набору маленьких (радиусом порядка  $4''$ ) круглых диафрагм на периферии галактик, исключая небольшие области более высокой яркости. Затем поток в этих апертурах суммировался и пересчитывался в звездные величины и цвета. Для части объектов с неясным расположением H II областей мы использовали  $H\alpha$ -снимки, полученные на БТА. Оценка времени от начала эпохи или «короткого эпизода» звездообразования, которую при определенных допущениях можно считать оценкой возраста самых старых видимых звезд, получена сравнением цветов периферийных областей галактик с модельными эволюционными треками из пакета PEGASE2 [21].

При выборе участков периферии для определения цветов наиболее старого населения мы выбирали далекие от центра области, для которых можно было еще измерить потоки с разумной точностью. Поэтому для галактик с разной величиной центральной поверхностной яркости и/или характерным размером поверхностная яркость изученных периферийных областей заметно менялась — от  $SB_B = 24^m5/\square''$  до  $26^m9/\square''$ , при медианном значении  $SB_B(\text{median}) = 25^m3/\square''$ . Для перехода



**Рис. 2.** Диаграмма  $(g-r)$  и  $(r-i)$  цветов внешних частей 85-ти галактик войда Лупх-Сансег в сравнении с эволюционными треками пакета PEGASE2 для двух крайних случаев закона звездообразования. Обозначения такие же, как на рис. 1.

от значений  $SB_g$ , реально измеренных на радиальных профилях яркости, к параметру  $SB_B$  мы использовали типичный для галактик войда цветовой индекс  $B-g = 0.4$ .

Пакет программ PEGASE2 предназначен для расчета моделей фотометрической эволюции галактик. Основными параметрами моделей являются: начальная функция масс звезд  $\varphi(M) = M^{-(1+x)}$ , закон звездообразования  $SFR(t)$ , металличность звезд  $Z$ . Для нашего анализа использованы начальные функции масс (IMF) из работ Солпитера [34] и Кroupa и др. [35] как наилучшим образом описывающие наблюдательные данные по распределению масс звезд в близких галактиках. Для законов звездообразования использованы два крайних сценария: одномоментный эпизод звездообразования — вспышка (inst), и непрерывное звездообразование с постоянной скоростью (const). Треки всех остальных не экзотических сценариев будут располагаться между этими крайними. Для каждого фиксированного момента времени от начала звездообразования самые голубые цвета дает трек для сценария const, так как доля массивных голубых звезд для него уменьшается медленнее, чем для inst трека. В областях  $ugr$  диаграммы, где треки const и inst проходят достаточно близко (см. рис. 1), время от начала звездообразования и, соответственно, возраст наиболее старых звезд для трека const примерно впятеро больше, чем для треков inst. Поэтому в случаях неопределенности оценки возрастов наиболее старых звезд по трекам const дают сохраняющиеся верхние пределы и, таким образом, могут служить оценками сверху для возрастов видимого распределенного старого населения. Все полученные данные для цветов внешних областей исследованных галактик показаны на двухцветных диаграммах  $ugr$  и  $gri$  для

сопоставления с описанными выше модельными треками (рис. 1 и 2).

При сравнении наблюдаемых цветов галактики и цветов модельных треков за металличность звезд для треков принималась величина из дискретного набора, предлагаемого в PEGASE2, наиболее близкая к измеренной металличности газа для каждой галактики. В основном использовалось одно из трех:  $Z = 0.004$ ,  $Z = 0.002$ ,  $Z = 0.001$ .

Фактически кривые пропускания фильтров, использованные при расчетах эволюционных треков PEGASE2, и фильтров  $u$ ,  $g$ ,  $r$ ,  $i$ , использованных в реальных SDSS наблюдениях, немного различаются. Чтобы устранить связанные с этим небольшие систематические сдвиги, мы использовали соотношения из работы Таккера и др. [36].

### 3.2. Массовая доля газа

Для галактик выборки с доступными данными об интегральных потоках  $F(\text{HI})$  в линии 21 см водорода можно получить оценку полной массы водорода  $\mathcal{M}(\text{HI})$ , используя формулу для оптически тонкого слоя:  $\mathcal{M}(\text{HI}) = 2.36 \times F(\text{HI}) D^2 10^5$  [37], где  $D$  — расстояние до галактики в Мпк, и поток  $F(\text{HI})$  — в единицах  $\text{Jy km s}^{-1}$ . Для оценки полной массы газа  $\mathcal{M}_{\text{gas}}$  необходимо учесть вклад гелия (0.33 от  $\mathcal{M}(\text{HI})$ ). Вкладом массы молекулярного газа в карликовых галактиках в первом приближении можно пренебречь. Примерно для половины галактик данные  $F(\text{HI})$  собраны нами из литературы, а для остальных получены по наблюдениям на радиотелескопе NRT.

Результаты фотометрии, полученные в этой работе, могут быть использованы для оценки полной массы звезд. Зная массу газа и звезд, можно получить эволюционный параметр — массовую долю газа. Полная масса звезд  $\mathcal{M}_*$  стандартно оценивается по интегральной светимости галактик в одном из широкополосных фильтров  $\lambda$  с помощью соответствующего параметра  $\Upsilon_\lambda = \mathcal{M}_*/L_\lambda$  — отношения масса—светимость для звездного населения, зависящего от цвета звездного континуума. Для оценок  $\mathcal{M}_*$  мы использовали отношение масса—светимость  $\Upsilon$  и его зависимость от цветовых индексов, выведенную в работе Зибетти и др. [38]. Конкретно, мы использовали  $\Upsilon_g(g-i)$  и светимость в  $g$ -фильтре как дающие наиболее устойчивые результаты в оптическом диапазоне. Отношение масса—светимость  $\Upsilon$  из [38], на наш взгляд, наиболее адекватно учитывает сложную историю звездообразования в маломассивных галактиках, включая и относительно недавние эпизоды.

По оцененной таким образом массе звезд  $\mathcal{M}_*$  вычислялась барионная масса галактики  $\mathcal{M}_{\text{bary}} = \mathcal{M}_* + \mathcal{M}_{\text{gas}}$ , а затем и массовая доля газа

$f_{\text{gas}}$ , то есть отношение полной массы газа к полной барионной массе. Кроме этого для сравнения с другими выборками мы оценили часто используемый в менее детальных исследованиях модельно-независимый параметр  $\mathcal{M}(\text{HI})/L_B$  — отношение массы водорода к светимости в  $B$ -полосе в солнечных единицах, где  $L_B$  вычислялось через  $B_{\text{tot}}$ , рассчитанную по данным нашей независимой фотометрии в фильтрах  $g, r$  с помощью соотношений Лаптона [27]. Для выборок галактик без информации о цветах этот параметр дает грубую оценку относительной массы газа.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные параметры нашей подвыборки 85-ти галактик войда Lynx–Cancer представлены в таблице 1. В ее колонках приведены: (1) имя галактики; (2) имя объекта в коротком формате IAU; (3) тип галактики, принятый либо как в [15] — для объектов из оригинальной выборки, либо по NED,<sup>1</sup> либо наша оценка, если отсутствует в NED; (4) лучевая гелиоцентрическая скорость  $V_{\text{hel}}$  в  $\text{km s}^{-1}$ ; (5) расстояние до объекта в Мпк (оцененное как в [15], т.е. с учетом поправки за большую peculiar отрицательную скорость в этой области); (6) экстинкция  $A_B$  в  $B$ -полосе в Галактике, взятая из [30]; (7, 8) полные видимые  $B_{\text{tot}}$  (не исправленные за поглощение в Галактике) и абсолютные  $M_{B,0}$  (исправленные за поглощение) звездные величины, пересчитанные из нашей независимой фотометрии по формулам [27] и использованные далее в статистическом анализе; (9) полные видимые звездные величины  $B_{\text{tot}}$ , взятые из NED (для сравнения с полученными нами); (10) масса водорода  $\mathcal{M}(\text{HI})$  в единицах  $10^7 M_\odot$  (по данным из литературы и наблюдениям на NRT); (11) отношение массы водорода к светимости  $\mathcal{M}(\text{HI})/L_B$  в фильтре  $B$  в солнечных единицах; (12) масса звезд  $\mathcal{M}_*$  в единицах  $10^7 M_\odot$ ; (13) массовая доля газа  $f_{\text{gas}}$ ; (14) содержание кислорода  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ ; (15) наблюдаемое отношение полуосей  $b/a$ .

Таблица с параметрами, полученными по фотометрии и анализу изображений SDSS, приведена в базе данных Vizier.<sup>2</sup> В таблице представлены следующие модельно-независимые параметры: радиусы галактики, внутри которых содержится 50% и 90% ее потока в фильтре  $g$ ; эффективная поверхностная яркость в фильтре  $g$ , определенная как средняя поверхностная яркость внутри радиуса  $R_{50}(g)$ ; «оптический» радиус (на изофоте

<sup>1</sup>NASA/IPAC Extragalactic Database, <http://ned.ipac.caltech.edu>

<sup>2</sup><http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/other/AstBu/69.247>

Таблица 1. Основные параметры галактик в войде Lухр—Сапсер

№	Имя или префикс (1)	Имя в коротком IAU формате (2)	Тип (3)	$V_{\text{hel}}$ , км с <sup>-1</sup> (4)	Dist., Мпк (5)	$A_B^{\text{NED}}$ , mag (6)	$B_{\text{tot}}$ , mag (7)	$M_{B,0}$ , mag (8)	$B_{\text{tot}}^{\text{NED}}$ , mag (9)	$\mathfrak{M}(\text{HI})$ , $10^7 M_{\odot}$ (10)	$\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B$ (11)	$\mathfrak{M}_{\text{stars}}^*$ , $10^7 M_{\odot}$ (12)	$f_{\text{gas}}$ (13)	$12 + \log(\text{O}/\text{H})$ (14)	$b/a$ (15)
1	IRPASS J0626+24	J0626+2439	Scd	1473	23.04	1.79	17.98	-15.62	17.60	—	—	15.60	—	—	0.59
2	UGC 3600	J0655+3905	Im	412	9.30	0.29	15.92	-14.22	16.18	11.23	1.48	2.21	0.87	7.66	0.27
3	UGC 3672	J0706+3019	Im	994	16.93	0.32	16.04	-15.43	15.40	79.50	3.45	2.71	0.98	7.99	0.55
4	SDSS	J0713+2926	Im	950	16.26	0.31	16.66	-14.71	16.79	—	—	3.28	—	—	0.63
5	SDSS	J0723+3621	Sm	917	16.00	0.23	17.01	-14.25	17.01	22.60	2.91	3.26	0.90	7.45	0.31
6	SDSS	J0723+3622	dI	970	16.00	0.23	19.46	-11.79	19.31	9.61	11.84	0.08	0.99	—	0.71
7	SDSS	J0723+3624	dI	938	16.00	0.23	21.68	-9.57	21.56	2.90	27.62	0.01	0.99	—	0.47
8	UGC 3860	J0728+4046	Im	354	7.81	0.25	15.21	-14.50	14.96	16.92	1.73	2.47	0.90	7.83	0.56
9	UGC 3876	J0729+2754	SAd	854	15.01	0.19	13.77	-17.31	13.70	99.48	0.77	88.62	0.60	7.88	0.58
10	SDSS	J0730+4109	dI	874	15.70	0.27	16.67	-14.58	16.67	4.36	0.41	2.81	0.67	8.02	0.59
11	SDSS	J0737+4724	LSB	476	10.42	0.47	18.02	-12.54	18.06	2.51	1.56	0.15	0.96	7.28	0.47
12	UGC 3966	J0741+4006	Im	361	8.64	0.22	15.32	-14.58	14.44	44.26	4.18	1.37	0.98	7.56	0.86
13	DDO 47	J0741+1648	IBsm	272	8.04	0.14	14.89	-14.78	13.62	—	—	3.96	—	—	0.44
14	KK 65	J0742+1633	dIrr	279	8.01	0.14	15.51	-14.15	15.34	—	—	2.62	—	—	0.37
15	SDSS	J0744+2508	Ir	749	12.95	0.18	18.11	-12.63	18.35	1.38	0.79	0.33	0.85	7.21	0.84
16	SDSS	J0744+2506	Ir	669	12.95	0.18	20.47	-10.28	20.30	—	—	0.08	—	—	0.83
17	MCG 9-13-52	J0746+5117	Sm	445	10.10	0.27	16.54	-13.75	16.78	6.25	1.27	1.56	0.84	7.66	0.74
18	MCG 9-13-56	J0747+5111	Sm	439	10.00	0.30	15.12	-15.18	15.48	13.69	0.75	2.94	0.86	7.70	0.68
19	UGC 4115	J0757+1423	IAm	341	7.73	0.12	14.81	-14.75	15.23	8.37	0.68	3.99	0.74	7.60	0.60
20	UGC 4117	J0757+3556	IBm	773	14.12	0.20	15.36	-15.59	15.34	23.73	0.89	4.05	0.89	7.82	0.75
21	UGC 4148	J0800+4211	Scd	716	13.55	0.18	15.66	-15.18	15.63	54.15	2.94	3.18	0.96	7.83	0.42
22	NGC 2500	J0801+5044	SBcd	504	10.88	0.17	12.14	-18.21	12.23	96.60	0.32	141.30	0.48	8.36	1.00

Таблица 1. (Продолжение)

№	Имя или префикс (1)	Имя в коротком IAU формате (2)	Тип (3)	$V_{hel}$ , км с <sup>-1</sup> (4)	Dist., Мпк (5)	$A_B^{NED}$ , mag (6)	$B_{tot}$ , mag (7)	$M_{B,0}$ , mag (8)	$B_{tot}^{NED}$ , mag (9)	$\mathfrak{M}(HI)$ , $10^7 M_{\odot}$ (10)	$\mathfrak{M}(HI)/L_B$ (11)	$\mathfrak{M}_{stars}^*$ , $10^7 M_{\odot}$ (12)	$f_{gas}$ (13)	$12 + \log(O/H)$ (14)	$b/a$ (15)
23	MCG 7-17-19	J0809+4135	Sc	704	13.37	0.22	15.46	-15.39	16.65	25.31	1.14	6.42	0.84	7.96	0.60
24	SDSS	J0810+1837	Sm	1483	23.05	0.16	18.39	-13.59	18.29	6.27	1.48	1.25	0.87	7.79	0.46
25	SDSS	J0812+4836	dIr	521	11.05	0.22	17.36	-13.08	17.23	4.85	1.83	0.43	0.94	7.27	0.52
26	NGC 2537	J0813+4559	BCG	445	9.86	0.23	12.49	-17.71	12.27	48.44	0.26	-	-	8.37	0.94
27	IC 2233	J0813+4544	Sd	553	10.70	0.22	13.34	-17.03	13.05	54.30	0.54	28.96	0.71	8.08	0.11
28	NGC 2541	J0814+4903	SABc	548	12.00	0.22	12.34	-18.28	12.25	460.82	1.45	106.35	0.85	8.02	0.60
29	NGC 2552	J0819+5000	SAm	524	11.11	0.20	13.01	-17.42	12.92	83.01	0.58	47.15	0.70	8.28	0.68
30	KUG 0821+321	J0825+3201	Ir	648	12.25	0.20	16.91	-13.73	16.10	3.54	0.73	1.44	0.77	7.60	0.67
31	HS 0822+3542	J0825+3532	BCG	720	13.49	0.20	17.88	-12.97	17.92	1.46	0.61	-	-	7.44	0.78
32	SAO 0822+3545	J0826+3535	Im	740	13.49	0.20	17.74	-13.11	17.56	4.30	1.57	0.17	0.97	-	0.80
33	UGC 4426	J0828+4151	Im	397	10.30	0.16	15.35	-14.87	15.13	27.05	1.96	6.75	0.84	7.58	0.63
34	SDSS	J0831+4104	LSB	582	11.64	0.16	17.71	-12.78	17.71	0.58	0.29	0.64	0.55	-	0.90
35	SDSS	J0843+4025	Im	614	12.05	0.14	17.90	-12.65	17.83	0.62	0.35	0.43	0.65	7.49	0.70
36	SDSS	J0845+1519	dI	1642	24.99	0.09	18.61	-13.47	18.60	-	-	2.29	-	-	0.79
37	SDSS	J0852+1350	Im	1511	23.08	0.16	17.40	-14.58	17.43	26.40	2.50	3.23	0.92	7.28	0.76
38	SDSS	J0852+1351	dI	1541	23.08	0.16	19.82	-12.16	19.73	-	-	0.24	-	-	0.64
39	UGC 4704	J0859+3912	Sdm	596	11.74	0.13	14.82	-15.66	15.51	72.86	2.56	7.25	0.93	7.96	0.13
40	SDSS	J0859+3923	dI	588	11.63	0.11	17.25	-13.19	16.98	1.56	0.53	1.04	0.67	7.57	0.93
41	SDSS	J0900+3222	dI	740	13.45	0.14	18.97	-11.81	18.86	-	-	0.45	-	-	0.64
42	UGC 4722	J0900+2536	Sdm	1794	27.89	0.17	14.86	-17.54	15.16	-	-	26.09	-	7.66	0.18
43	SDSS	J0900+4908	Sdm:	1600	25.78	0.09	18.49	-13.65	18.63	-	-	1.50	-	-	0.72
44	SDSS	J0908+0657	Sdm	1571	23.45	0.19	17.06	-14.98	17.00	4.80	0.31	6.26	0.51	-	0.57

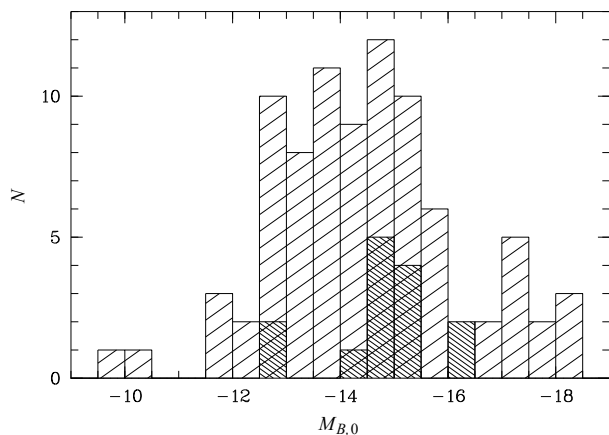
Таблица 1. (Продолжение)

№	Имя или префикс (1)	Имя в коротком IAU формате (2)	Тип (3)	$V_{\text{hel}}$ , км с <sup>-1</sup> (4)	Dist., Мпк (5)	$A_B^{\text{NED}}$ , mag (6)	$B_{\text{tot}}$ , mag (7)	$M_{B,0}$ , mag (8)	$B_{\text{tot}}^{\text{NED}}$ , mag (9)	$M(H I)$ , $10^7 M_{\odot}$ (10)	$M(H I)/L_B$ (11)	$M_{\text{stars}}$ , $10^7 M_{\odot}$ (12)	$f_{\text{gas}}$ (13)	$12 + \log(O/H)$ (14)	$b/a$ (15)
45	SDSS	J0908+0517	dl	598	10.01	0.20	17.21	-12.99	16.96	2.70	1.10	0.22	0.94	7.60	0.99
46	SDSS	J0911+3135	dl	750	13.52	0.07	18.05	-12.68	17.97	1.81	0.99	0.26	0.90	7.50	0.87
47	IC2450	J0917+2525	S0	1644	25.47	0.14	14.06	-18.11	13.84	-	-	197.00	-	-	0.61
48	SDSS	J0926+3343	LSB	536	10.63	0.08	17.30	-12.91	17.34	6.77	2.98	0.13	0.99	7.12	0.25
49	SDSS	J0928+2845	dl	1229	19.90	0.09	16.76	-14.82	16.70	23.37	1.77	8.90	0.78	7.68	0.49
50	SDSS	J0929+2502	dl	1661	25.66	0.14	19.24	-12.95	19.03	5.59	2.38	0.35	0.95	7.20	0.89
51	SDSS	J0929+1155	dl	1614	24.29	0.11	17.20	-14.84	17.36	-	-	3.01	-	-	0.40
52	SDSS	J0931+2717	Srr	1505	23.60	0.08	18.00	-13.94	17.98	-	-	1.11	-	7.55	0.52
53	CGCG035-007	J0934+0625	Sc	574	9.23	0.18	15.42	-14.59	15.22	12.67	1.19	5.77	0.75	-	0.78
54	KUG 0934+277	J0937+2733	Im	1594	25.16	0.08	16.50	-15.59	16.53	-	-	7.65	-	-	0.74
55	SDSS	J0940+4459	dl	1246	20.71	0.06	18.01	-13.63	17.96	-	-	1.64	-	7.40	0.72
56	KISSB23	J0940+2935	Sd	505	10.21	0.10	16.07	-14.08	16.32	5.41	0.81	1.35	0.84	7.60	0.49
57	SDSS	J0942+0937	dl	1461	22.00	0.11	18.15	-13.67	21.40	-	-	2.52	-	-	0.81
58	UGC 5186	J0942+3315	Im	551	10.77	0.06	15.99	-14.23	16.27	2.57	0.34	2.13	0.62	-	0.40
59	SDSS	J0943+4134	dl	1403	22.77	0.06	17.64	-14.21	17.63	4.89	0.65	2.61	0.71	-	0.56
60	SDSS	J0944+1000	dl	1477	22.22	0.12	16.96	-14.90	16.95	-	-	4.21	-	-	0.90
61	IC 559	J0944+0936	Sc	541	9.40	0.12	14.77	-15.22	14.98	-	-	6.89	-	-	0.87
62	UGC 5209	J0945+3214	Im	538	10.55	0.08	16.32	-13.88	16.06	4.02	0.72	1.95	0.73	-	0.75
63	SDSS	J0947+4138	dl	1389	22.56	0.07	17.92	-13.92	17.61	1.20	0.21	0.48	0.77	7.76	0.54
64	MRK 407	J0947+3905	comp	1589	25.21	0.07	15.28	-16.80	15.27	-	-	-	-	-	0.74
65	UZC J09475+390	J0947+3908	dl	1553	24.73	0.07	16.85	-15.19	17.00	-	-	3.31	-	7.50	0.63
66	SDSS	J0947+3905	dl	1479	23.70	0.07	18.03	-13.92	18.12	-	-	1.49	-	-	0.63

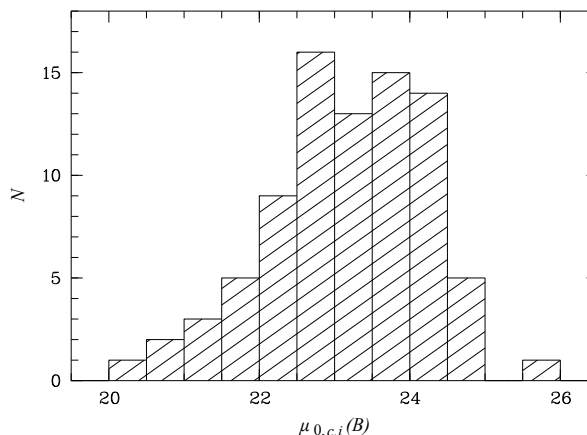


Таблица 1. (Продолжение)

№	Имя или префикс (1)	Имя в коротком IAU формате (2)	Тип (3)	$V_{hel}$ , км с <sup>-1</sup> (4)	Dist., Мпк (5)	$A_B^{NED}$ , mag (6)	$B_{tot}$ , mag (7)	$M_{B,0}$ , mag (8)	$B_{tot}^{NED}$ , mag (9)	$\mathfrak{M}(H I)$ , $10^7 M_{\odot}$ (10)	$\mathfrak{M}(H I)/L_B$ (11)	$\mathfrak{M}_{stars}^{NED}$ , $10^7 M_{\odot}$ (12)	$f_{gas}$ (13)	$12 + \log(O/H)$ (14)	$b/a$ (15)
67	UGC5272b	J0950+3127	Im	539	10.27	0.10	17.56	-12.60	17.68	2.89	1.70	0.20	0.95	7.60	0.67
68	UGC5272	J0950+3129	Im	520	10.30	0.10	14.45	-15.71	14.46	46.33	1.55	3.51	0.95	7.84	0.42
69	UGC5288	J0951+0749	Sdm	556	9.47	0.15	14.42	-15.61	14.62	-	-	10.31	-	-	0.92
70	SDSS	J0951+3842	dI	1435	23.07	0.08	17.46	-14.44	17.42	-	-	1.86	-	7.85	0.89
71	SDSS	J0954+3620	dI	503	10.22	0.04	18.05	-12.04	17.93	0.62	0.60	0.17	0.83	-	0.62
72	IC2520	J0956+2713	S	1243	19.93	0.09	14.27	-17.32	14.70	-	-	151.83	-	-	0.87
73	SDSS	J0956+2716	dI	1074	17.63	0.09	18.13	-13.19	18.39	-	-	0.80	-	-	0.54
74	UGC5340	J0956+2849	BC/Im	502	9.86	0.08	14.70	-15.35	14.60	66.35	3.10	1.62	0.98	7.14	0.44
75	SDSS	J0957+2745	dI	1184	19.14	0.08	18.16	-13.33	18.08	-	-	0.68	-	-	0.60
76	UGC5354	J0958+4744	Sm	1168	19.68	0.07	14.15	-17.39	14.60	-	-	33.93	-	-	0.56
77	PC0956+4751	J0959+4736	dI	1093	18.66	0.07	17.05	-14.37	17.14	14.87	1.70	2.01	0.91	-	0.45
78	SDSS	J1000+3032	dI	501	9.90	0.08	18.14	-11.92	18.06	0.28	0.30	0.35	0.51	7.42	0.79
79	KUG0959+299	J1002+2943	dI	766	13.48	0.10	17.36	-13.39	17.32	-	-	0.62	-	-	0.77
80	UGC5427	J1004+2921	SABd	498	9.79	0.10	14.91	-15.15	14.89	5.98	0.34	5.53	0.59	7.90	0.64
81	UGC5464	J1008+2932	Sm	1003	16.90	0.10	15.77	-15.47	15.62	19.29	0.81	10.22	0.72	7.86	0.46
82	SDSS	J1010+4617	dI	1092	18.58	0.03	18.23	-13.15	18.20	0.49	0.17	0.58	0.53	7.78	0.45
83	UGC5540	J1016+3746	Sc	1162	19.16	0.07	14.63	-16.85	14.60	46.55	0.54	27.40	0.69	8.00	0.36
84	HS 1013+3809	J1016+3754	BCG	1173	19.30	0.07	16.02	-15.48	15.99	13.28	0.55	-	-	7.59	0.65
85	SDSS	J1019+2923	dI	874	15.25	0.14	17.48	-13.57	17.43	8.23	1.97	0.66	0.94	-	0.41



**Рис. 3.** Распределение абсолютной звездной величины в фильтре  $B$  для 85-ти галактик войда Lync–Cancer. Частой штриховкой показано распределение подвыборки 14-ти так называемых «рудиментарных» (inchoate) галактик из работы Гарсия-Аппадоо и др. [22].



**Рис. 4.** Распределение центральной поверхностной яркости в фильтре  $B$ , исправленной за экстинкцию в Галактике и наклон к лучу зрения, для 85-ти галактик войда.

$25^m0/\square''$ ) в фильтре  $g$  в секундах дуги ( $R^{25}(g)$ ) и в кпк ( $a_{25}$ ); звездная величина в фильтре  $g$  внутри «оптического» радиуса; радиус на изофоте  $26^m5/\square''$  (радиус Холмберга) [28] и звездная величина в фильтре  $g$  внутри данного радиуса; оптические размеры, пересчитанные как  $b = R^{25}(g) \sqrt{b/a}$  и  $a = R^{25}(g) \sqrt{a/b}$ , в секундах дуги и в кпк; интегральные звездные величины в фильтре  $g$ ; интегральные цвета  $(u - g)$ ,  $(g - r)$ ,  $(r - i)$  и  $(u - g)$ ,  $(g - r)$ ,  $(r - i)$ -цвета периферии с учетом экстинкции в Галактике. Приближение фотометрических профилей экспоненциальным диском или, в более общем случае, законом Серсика [29] дает модельные параметры, также представленные в данной таблице: центральные поверхностные яркости в фильтрах  $g$  и  $r$ ; центральные поверхностные яркости в  $B$ -полосе (подсчитанные с помощью соотношений [27]) без учета и с учетом экстинкции в Галактике и наклона к лучу зрения; масштабную длину в угловых секундах; индекс Серсика.

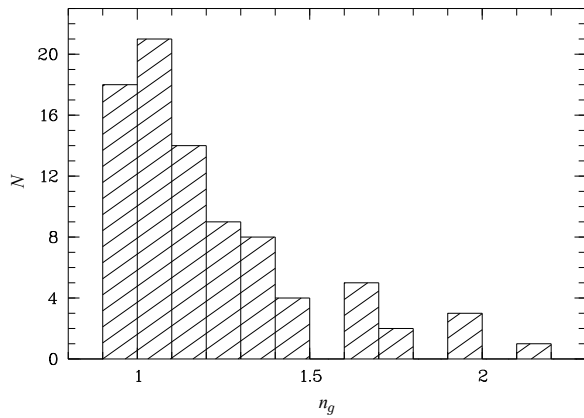
## 5. АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 5.1. Распределения параметров

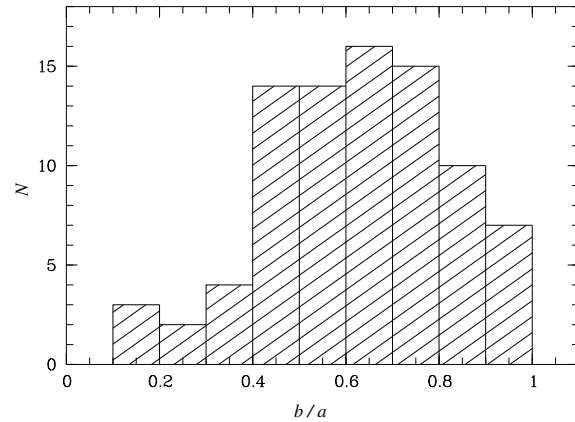
Для понимания полного диапазона изменения характерных величин наиболее важных параметров изучаемой выборки были построены их наблюдаемые распределения. Распределение абсолютной звездной величины  $M_{B,0}$  для объектов войда, рассчитанной по данным нашей фотометрии и исправленной за экстинкцию в Галактике, показано на рис. 3 (редкая штриховка). Для сравнения, мы показываем распределение  $M_{B,0}$

для подвыборки так называемых «рудиментарных» (inchoate) галактик из обзора ES [22] (нанесены обратной штриховкой на том же рисунке). Эти 14 галактик выделены авторами из полного числа 195 объектов экваториального обзора, так как обладают необычными свойствами — голубыми цветами и высоким отношением  $\mathcal{M}(\text{HI})/L_g$ . Для части этих объектов в [22] переоценены потоки в линии 21 см, что приводит к слишком высокому отношению  $\mathcal{M}(\text{HI})/L_g$ . Мы исправили эти значения, учитывая новые данные из литературы, так что они стали не такими выдающимися. В частности, для NE-компонента пары HI 1225+01 (HIPERQ 1227+01) параметр  $\mathcal{M}(\text{HI})/L_B$  равен 10.1, а не 22. Кроме того, для лучшего понимания природы галактик этой подвыборки мы проверили их окружение на наличие массивных галактик. Из 14-ти «рудиментарных» галактик 9 находятся не ближе 1 Мпк от массивной галактики, из них для 6-ти наиболее богатых газом расстояния до массивной галактики составляют 2–5 Мпк. Таким образом, галактики этой подвыборки, так же как наши галактики войда, показывают явные признаки изолированности.

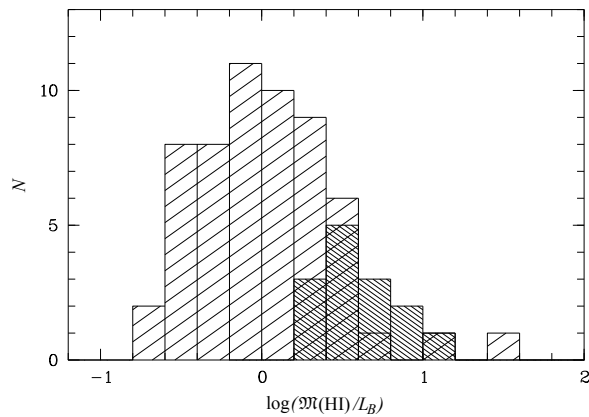
На рис. 4 показано распределение центральной поверхностной яркости  $\mu_{0,c,i}(B)$  в фильтре  $B$  (с учетом экстинкции в Галактике и коррекции за наклон к лучу зрения) для галактик исследуемой подвыборки в войде Lync–Cancer. Доля галактик с  $\mu_{0,c,i}(B) > 23^m0/\square''$  (LSB) в этой подвыборке составляет примерно 50%. На рис. 5 представлено распределение по индексу Серсика  $n_g$ , определенному моделированием радиального профиля яркости для изображения в фильтре  $g$ . Для почти двух третей объектов индекс  $n_g$  достаточно близок



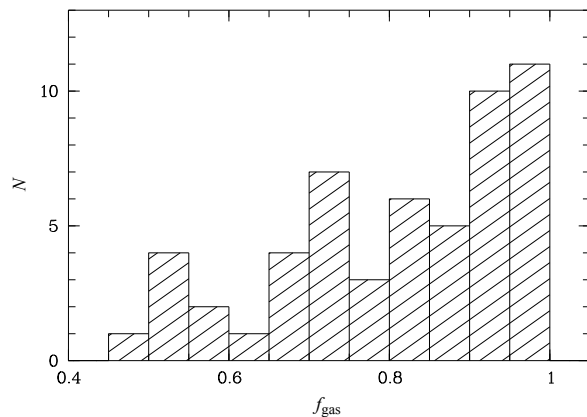
**Рис. 5.** Распределение индекса Серсика [29] радиального профиля поверхностной яркости в фильтре  $g$  для 85-ти галактик войда.



**Рис. 6.** Распределение наблюдаемого отношения полуосей  $b/a$  для 85-ти галактик войда.



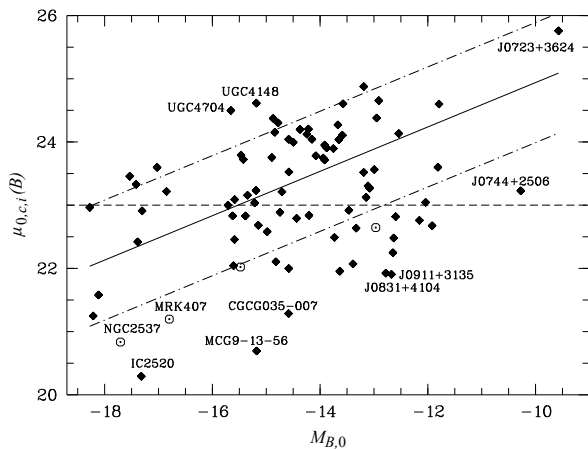
**Рис. 7.** Распределение галактик войда по отношению массы водорода к светимости  $\mathcal{M}(\text{HI})/L_B$  (в солнечных единицах) в фильтре  $B$ . Обратной штриховкой показано распределение подвыборки 14 «рудиментарных» галактик из общей выборки слепого HI обзора (ES) из работы Гарсия-Аппадоо и др. [22].



**Рис. 8.** Предварительное (примерно по половине выборки) распределение массовой доли газа (см. описание в тексте) для 54 галактик войда по HI-данным из литературы и по наблюдениям на радиотелескопе NRT.

к 1, то есть профили яркости близки к экспоненциальным. Для остальных галактик с  $n_g$  в диапазоне от 1.2 до 2.1 профиль яркости заметно уплощается к центру. Распределение наблюдаемого отношения полуосей  $b/a$  на рис. 6 показывает, что порядка 50% объектов выборки значительно наклонены к лучу зрения ( $b/a < 0.65$  и, соответственно, угол  $i > 50^\circ$ ). Как показано в [15], из-за избирательности спектрального обзора SDSS по поверхностной яркости многие LSB-галактики войда, имея полную звездную величину ярче формального порога SDSS  $r_{\text{petro}} < 17.77$  [39], могли остаться без определения скорости. Благодаря наклону к лучу зрения, их видимая яркость увеличена, что повысило вероятность их включения в спектральную часть SDSS.

Распределение отношения массы водорода к светимости  $\mathcal{M}(\text{HI})/L_B$  представлено на рис. 7 (редкая штриховка). Для 57 галактик нашей выборки медианное значение  $\mathcal{M}(\text{HI})/L_B \sim 1.0$ . Здесь же, как и на рис. 3, приведено для сравнения распределение подвыборки «рудиментарных» галактик из работы Гарсия-Аппадоо и др. [22] (обратная штриховка). Медианное значение  $\mathcal{M}(\text{HI})/L_B$  для нее составляет примерно 3.4. Само название «рудиментарные» авторы [22] связывают с их неправильной формой, предполагая, что они находятся в процессе формирования или в начале эволюции. Как показано ниже, часть галактик нашей выборки также обладает необычными свойствами, напоминая «рудиментарные» объекты из ES выборки (см. таблицу 1). Они также являются необычно



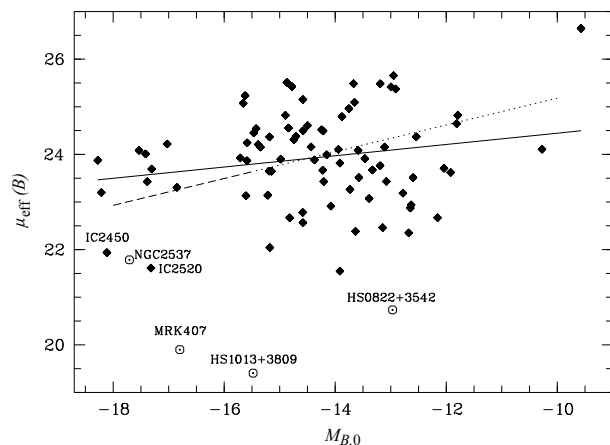
**Рис. 9.** Соотношение между абсолютной величиной  $M_{B,0}$  и центральной поверхностной яркостью  $\mu_{0,c,i}(B)$  для 85-ти галактик войда Лунх–Сансер. Штриховая горизонтальная линия соответствует значению  $23^m/\square''$ , выше которого находится область LSB-галактик. Линейная регрессия (сплошная прямая) проведена по точкам для 81 галактики исследуемой подвыборки. Штрих-пунктирные прямые — разброс точек подвыборки. Четыре VCG (светлые кружки) не учитывались (см. текст).

голубыми ( $(B - V) < 0.3$ ), а медианное значение их параметра  $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B \sim 2.7$  сравнимо с таковым для подвыборки из [22].

Распределение массовой доли газа  $f_{\text{gas}}$  показано на рис. 8. Для 59% галактик войда с известными HI данными массовая доля газа попадает в диапазон 80–99%. Такая высокая концентрация богатых газом объектов в нашей выборке указывает на то, что для населения войдов свойственна более медленная эволюция, как уже указывалось в [16].

### 5.2. Соотношения между параметрами галактик войда

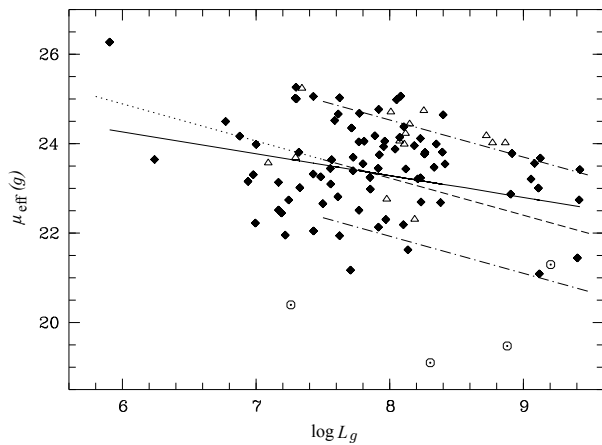
На рис. 9 сопоставлены абсолютная звездная величина  $M_{B,0}$  и центральная поверхностная яркость  $\mu_{0,c,i}(B)$  для подвыборки из 85-ти галактик войда Лунх–Сансер. Оба параметра исправлены за экстинкцию в Галактике. Центральные поверхностные яркости исправлены за наклон галактик к лучу зрения. Для галактик с существенным вкладом центральной области звездообразования или с «балджем» центральная SB была оценена по экстраполяции в центр профиля внешнего подстилающего диска. Около половины галактик классифицируется как LSB, т.е. их скорректированная центральная поверхностная яркость  $\mu_{0,c,i}(B) > 23^m/\square''$  (выше штриховой линии). Линейная регрессия (сплошная прямая) проведена по всем галактикам подвыборки за исключением 4-х



**Рис. 10.** Соотношение между абсолютной звездной величиной  $M_{B,0}$  и эффективной поверхностной яркостью  $\mu_{\text{eff}}(B)$  для 85-ти галактик войда Лунх–Сансер. Линейная регрессия (сплошная прямая) проведена по всем галактикам, за исключением 4-х VCG (светлые кружки). Аналогичная прямая из работы Кросса и Драйвера [13] (штриховая линия) по выборке приблизительно 45 000 галактик, экстраполированная в область до  $M_{B,0} < 10$  (пунктирная линия), в общем диапазоне  $M_{B,0} < -15.5$  проходит близко к нашей.

VCG — голубых компактных галактик с активным звездообразованием. Среднеквадратичное отклонение индивидуальных галактик относительно общего тренда достаточно велико:  $\sigma_{\mu_0} = 0^m97/\square''$  (штрих-пунктирные прямые). Светлыми кружками показаны положения четырех VCG. Эти редкие маломассивные галактики имеют повышенную центральную яркость, заметно отличаясь от более типичных карликов поздних типов.

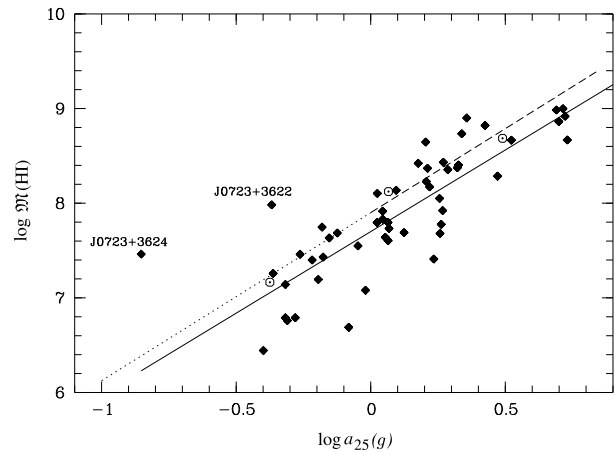
На рис. 10 показано соотношение между абсолютной звездной величиной  $M_{B,0}$  и эффективной поверхностной яркостью  $\mu_{\text{eff}}(B)$ . Оба параметра исправлены за экстинкцию в Галактике. Линейная регрессия, проведенная по 81 галактике войда с исключением 4-х VCG, показана сплошной прямой (коэффициент наклона  $k = 0.12 \pm 0.06$ ). Из-за большого рассеяния точек в середине диапазона наличие тренда определяется не очень надежно. Аналогичная прямая (показана штрихами), полученная для большой выборки галактик (примерно 45 000) из работы Кросс и Драйвер [13], экстраполированная в область низких светимостей (пунктирная прямая), хотя и проходит близко к центру распределения галактик войда, имеет наклон значительно больше ( $k = 0.28$ ). Вероятно, это различие связано с существенно более высокой долей карликов в выборке галактик войда и большим разнообразием их свойств. Кроме того, рассеяние около линии регрессии для выборки из работы [13] ниже, чем для выборки войда:  $\sigma_{\mu} \sim 0^m5/\square''$  и  $1^m0/\square''$  соответственно.



**Рис. 11.** Соотношение между эффективной поверхностной яркостью  $\mu_{\text{eff}}(g)$  и светимостью  $\lg L_g$ . Сплошная прямая — линейная регрессия по галактикам нашей выборки (заполненные ромбики), исключая VCG (светлые кружки). Штриховая прямая — линейная регрессия из работы [22], пунктирная прямая — ее продолжение в область низких светимостей, штрихпунктирные линии — разброс точек их выборки, светлые треугольники — группа 14-ти так называемых «рудиментарных» галактик, отмеченная в этой работе.

На рис. 11 показано соотношение между эффективной поверхностной яркостью  $\mu_{\text{eff}}(g)$  и светимостью  $\lg L_g$  — аналог предыдущего рисунка. Как и ранее, линейная регрессия (сплошная прямая) проведена по всем галактикам за исключением четырех VCG. Для того, чтобы сравнить наши соотношения с аналогичными по выборке 195 галактик из экваториального обзора (ES) [22], отобранных по эмиссии в линии 21 см слепого HI-обзора HIPASS, их линейная регрессия нанесена на рис. 11 штриховой прямой, которая для наглядности продлена в область низких светимостей пунктирной прямой. Светлыми треугольниками отмечены 14 объектов из их подвыборки так называемых «рудиментарных» галактик, имеющих голубые цвета и повышенное отношение массы водорода к светимости ( $(B - V) \leq 0.3$  и  $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B > 1.8$ ). Наклон нашей регрессии для галактик войда ( $k = -0.35 \pm 0.16$ ) примерно в 2.5 раза меньше, чем для ES-выборки ( $k = -0.83$ ). При этом в их выборке нет объектов с  $\lg L_g < 7.5$ . Наклон регрессии для выборки ES при этом довольно близок к наклону для выборки из [13], при корреляции со светимостью вместо абсолютной звездной величины ( $k = -0.70$ ). Разброс параметра  $\mu_{\text{eff}}(g)$  для галактик войда, так же как и для выборки обзора ES, весьма значителен, достигая 3-х и более величин для данной светимости.

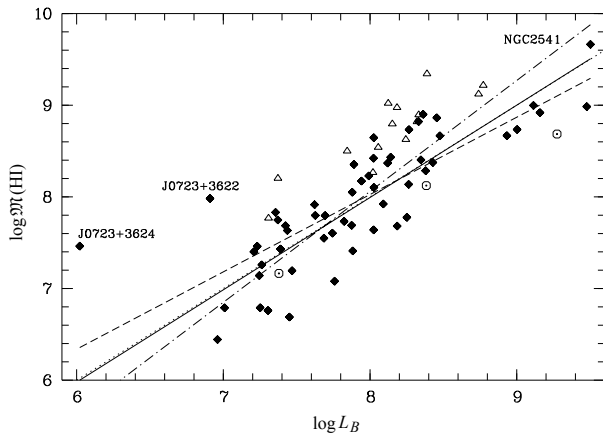
За счет галактик на краях диапазона уменьшение поверхностной яркости с уменьшением



**Рис. 12.** Соотношение между оптическим радиусом  $\lg a_{25}(g)$  (кпк) и массой водорода в галактике  $\lg \mathfrak{M}(\text{HI})$  (в солнечных единицах). Сплошная линия — линейная регрессия между данными величинами (наклон 1.96), из которой исключены VCG-галактики, обозначенные светлыми кружками. Для сравнения приведена зависимость из работы [22] (штриховая линия), и ее продолжение в область  $a_{25}(g) < 1$  кпк (пунктирная прямая).

светимости для соотношений, показанных на рис. 10 и 11, просматривается лучше или хуже. Но достаточно большое рассеяние  $\mu_{\text{eff}}(g)$  галактик войда в центре диапазона светимостей, по-видимому, означает, что кроме общей тенденции увеличения доли LSB-галактик, в войдах появляются и галактики с достаточно высокой поверхностной яркостью, что вероятно связано с их повышенным звездообразованием в последние несколько млрд лет. Возможной причиной отмеченного выше большого различия наклонов регрессии галактик войда Lynx-Cancer и выборки ES является наличие в последней значимой доли массивных галактик с повышенной концентрацией света в центре — балджем или следами вспышки звездообразования. Это приводит к смещению среднего для эффективной поверхностной яркости при больших светимостях в их выборке и большему наклону регрессии.

Соотношение между оптическими радиусами  $a_{25}(g)$  (кпк) и массой водорода в галактике  $\mathfrak{M}(\text{HI})$  (в солнечных единицах) показано на рис. 12. Кроме линейной регрессии по 85-ти галактикам нашей выборки (сплошная прямая,  $k = 1.96 \pm 0.16$ ), показана аналогичная зависимость из работы [22] (штриховая прямая). Видно их очень хорошее согласие в общем диапазоне. Наши данные позволяют продлить эту зависимость в область объектов с  $a_{25}(g) < 1$  кпк. Наклон регрессии, близкий к 2, отражает простой физический факт, что водород распределен в исследуемых галактиках в достаточно плоском диске, и что в большом диапазоне

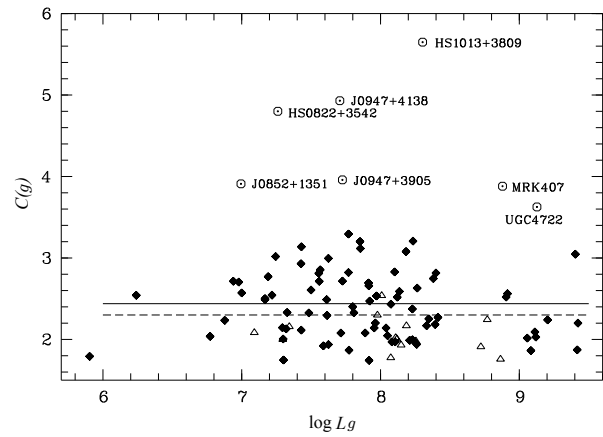


**Рис. 13.** Соотношение между массой водорода  $\lg \mathcal{M}(\text{HI})$  и светимостью  $\lg L_B$  в солнечных единицах. Штриховая линия — линейная регрессия по всему интервалу светимостей для галактик нашей выборки (заполненные ромбики), сплошная прямая — линейная регрессия без учета J0723+3622 и J0723+3624, штрих-пунктирная прямая — линейная регрессия по интервалу  $\lg L_B = 7.0-8.6$ . В каждом из вариантов были исключены VCG-галактики, обозначенные светлыми кружками. Светлые треугольники — группа так называемых «рудиментарных» галактик из работы [22], выделяющихся повышенным содержанием газа. Пунктирная линия соответствует  $\mathcal{M}(\text{HI})/L_B = 1$ .

эффективных размеров характерный радиус диска HI тесно коррелирует с оптическим. При этом имеется два объекта (J0723+3624, J0723+3622) с наибольшим отношением  $\mathcal{M}(\text{HI})/L_B > 10$ , которые сильно отскакивают от основной зависимости.

На рис. 13 представлено соотношение между массой водорода  $\mathcal{M}(\text{HI})$  и светимостью  $L_B$  (в солнечных единицах) для 54 галактик войда с известными массами HI. Штриховой прямой показана линейная регрессия по галактикам нашей выборки (ромбики,  $k_1 = 0.84 \pm 0.08$ ). Светлыми треугольниками для сравнения показаны «рудиментарные» галактики из работы [22]. Пунктирная прямая, на которой  $\mathcal{M}(\text{HI})/L_B = 1$ , отделяет галактики с высоким содержанием газа от более типичных галактик с нормальным содержанием газа. По этим же данным определяется зависимость параметра  $\mathcal{M}(\text{HI})/L_B$  от  $L_B$ , для которой наклон регрессии будет соответственно равен  $-0.16 \pm 0.08$ . Этот наклон в пределах довольно больших ошибок близок к наклону подобной зависимости, найденной для VCG в Местном сверхскоплении и в войдах в работе [40].

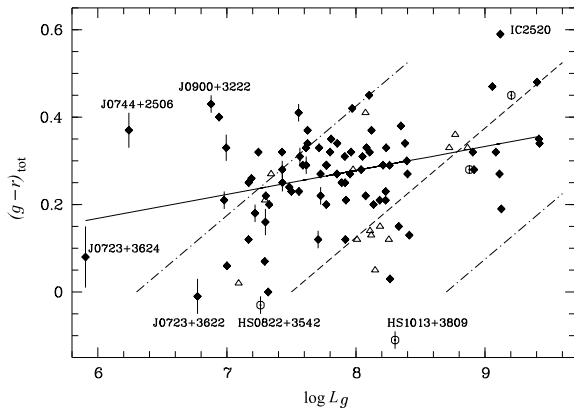
Более внимательный взгляд на обсуждаемый график наводит на мысль о том, что увеличение  $\mathcal{M}(\text{HI})/L_B$  при уменьшении  $L_B$  в основном обеспечено галактиками на краях диапазона,



**Рис. 14.** Соотношение между светимостью  $\lg L_g$  и индексом концентрации  $C(g)$  в фильтре  $g$ . Сплошная линия — среднее значение ( $R = 2.44$ ) по объектам нашей выборки (заполненные ромбики). Штриховая линия — среднее значение из работы [22] для их выборки из 195 объектов ( $R = 2.3$ ). Светлые треугольники — так называемая группа «рудиментарных» галактик, отмеченная в их работе.

включая и две самые богатые газом галактики триплета J0723+36. Мы приводим на графике другие варианты регрессии. Второй — без учета упомянутых членов триплета — сплошная прямая с наклоном  $k_2 = 1.01 \pm 0.08$  (52 объекта). И третий — только по «узкому» интервалу светимостей —  $\lg L_B = 7.0-8.6$  — штрих-пунктирная прямая с наклоном  $k_3 = 1.21 \pm 0.12$  (45 объектов). Сопоставление разности наклонов и ее «комбинированной ошибки» указывает на отличия на уровне  $2.5-3\sigma$ :  $k_1 - k_2 = -0.17 \pm 0.056$ ,  $k_1 - k_3 = -0.35 \pm 0.144$ . Таким образом, можно отметить, что характер связи двух глобальных параметров маломассивных галактик войдов для большого диапазона светимостей остается пока не совсем ясным. Необходима большая статистика, особенно для диапазона  $\lg L_B < 7.5$ . Включение в анализ остальных галактик этого войда, а также маломассивных галактик из других близких войдов позволит увеличить их общее число примерно в 2–3 раза и даст лучшее понимание обсуждаемой связи.

На рис. 14 видно, что индекс концентрации в фильтре  $g$ ,  $C(g) = R_{90g}/R_{50g}$  (где  $R_{90g}$  — радиус галактики, в котором заключено 90% ее потока в фильтре  $g$ ,  $R_{50g}$  — половина потока), не зависит от светимости  $L_g$ . Среднее значение по галактикам нашей выборки  $C(g) = 2.44$  (сплошная линия), что близко к значению 2.32 для чисто экспоненциальных дисков. При расчете среднего исключены, как и выше, VCG, а также очень компактные объекты (J0947+4138, J0947+3905, J0852+1351) и возмущенная дисковая галактика с приливным хвостом и

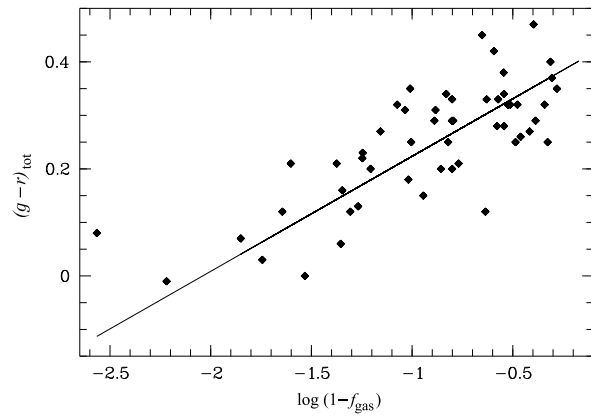


**Рис. 15.** Соотношение между светимостью  $\lg L_g$  в фильтре  $g$  и интегральным цветом  $(g-r)_{\text{tot}}$ . Сплошная прямая — линейная регрессия по объектам нашей выборки (заполненные ромбики), за исключением BCG (светлые кружки). Штриховая прямая — линейная регрессия из работы [22], штрих-пунктирные линии — разброс точек их выборки, светлые треугольники — группа «рудиментарных» галактик, отмеченная в [22].

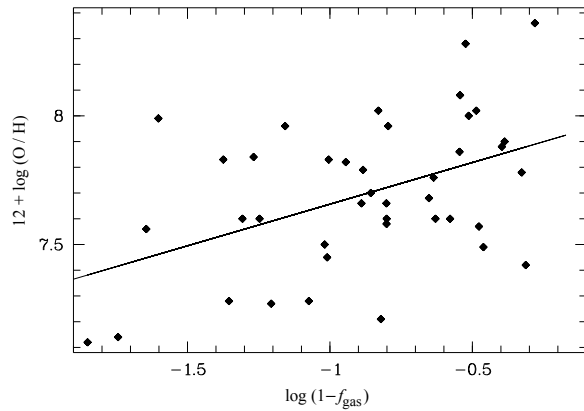
яркой вспышкой звездообразования — UGC 4722 (все обозначены светлыми кружками). Показано также среднее значение  $C(g) = 2.3$  для галактик из работы Гарсия-Аппадоо и др. [22] (штриховая прямая) и положения их «рудиментарных» галактик (светлые треугольники).

Соотношение между логарифмом светимости  $\lg L_g$  в фильтре  $g$  и интегральным цветом  $(g-r)_{\text{tot}}$  галактик войда показано на рис. 15. Сплошная прямая представляет линейную регрессию для этой выборки ( $k = 0.05 \pm 0.02$ ). Для сравнения показана штриховая прямая — линейная регрессия по галактикам ES-обзора ( $k = 0.25$ ), а также положения «рудиментарных» галактик из работы [22] (светлые треугольники). В то время как для ES выборки имеется сильный тренд, для галактик войда цвет  $(g-r)_{\text{tot}}$  (так же как и параметр  $\mu_{\text{eff}}(g)$  на рис. 11), в среднем меняется мало с уменьшением светимости, от 0.35 до примерно 0.15, хотя при этом имеется большой разброс показателя цвета. Чтобы лучше понять природу такого рассеяния, галактики с крайними значениями параметра  $(g-r)_{\text{tot}}$  надо изучить более детально.

На рис. 16 показано соотношение между массовой долей звезд ( $\lg(1-f_{\text{gas}})$ ) и интегральным цветом  $(g-r)_{\text{tot}}$ . Сплошной прямой показана линейная регрессия между этими параметрами ( $k = 0.215 \pm 0.024$ ). Как и следовало ожидать, здесь связь прослеживается лучше, чем на предыдущем рисунке, так как цвет  $(g-i)$  (который коррелирует с  $g-r$ ) входит в коэффициент  $\Upsilon$  для оценки массы звезд по светимости (см. раздел 3.2).



**Рис. 16.** Соотношение между массовой долей звезд ( $\lg(1-f_{\text{gas}})$ ) и интегральным цветом  $(g-r)_{\text{tot}}$ . Сплошная прямая — линейная регрессия по объектам нашей выборки.



**Рис. 17.** Соотношение между массовой долей звезд ( $\lg(1-f_{\text{gas}})$ ) и металличностью  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ . Сплошная прямая — линейная регрессия по объектам нашей выборки.

Чем он голубее, тем меньше масса звезд, и при данной массе газа меньше их массовая доля.

На рис. 17 показано соотношение между массовой долей звезд ( $\lg(1-f_{\text{gas}})$ ) и содержанием кислорода в межзвездной среде (аналог металличности)  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$  для галактик войда, у которых этот параметр на сегодня измерен. Как и выше, сплошная прямая показывает линейную регрессию ( $k = 0.32 \pm 0.10$ ). Видимый тренд падения металличности с уменьшением массовой доли звезд согласуется с ожидаемым в так называемой модели эволюции галактик «closed box» (т.е. без обмена с внешней средой). Однако разброс параметра O/H настолько велик, что в галактиках войда, включая и LSB-галактики, приближение «closed box», видимо, часто не выполняется.

Таблица 2. Параметры необычных галактик войда

Параметр	J0723+3622	J0723+3624	J0737+47	J0812+48	J0926+33	J0929+25	S 0822+3545	U 3966
$T_{\text{old}}$ , Gyr	1–2	2–2.5	2–3	4–6	3–3.5	3–5	1–3	2.5–3
$f_{\text{gas}}$	0.997	0.997	0.96	0.94	0.99	0.95	0.97	0.98
$12+\lg(\text{O}/\text{H})$	–	–	7.28	7.27	7.12	7.2:	–	7.56
$M_B$	–11.79	–9.57	–12.54	–13.08	–12.91	–12.95	–13.11	–14.58

### 5.3. Двухцветные диаграммы и оценки возрастов

На рис. 1 и 2 цвета внешних частей 81 галактики войда сопоставлены с моделями PEGASE2 для двух крайних случаев закона звездообразования (SF): мгновенного (inst) SF и непрерывного (const) SF с постоянным темпом. Приняты две начальные функции масс звезд (IMF): стандартная Salpeter и Kroupa. Для иллюстрации показаны треки с металличностью  $Z = 0.002$ , которая представляет примерно середину диапазона известных металличностей галактик в войде. Для 4-х BCG в нашей выборке вклад небулярной эмиссии во внешних частях может быть значителен. Эти объекты исключены из анализа, так как для них оценки цветов звездного населения ненадежны.

Для 77 из 81 изученных здесь галактик войда цвета их внешних частей достаточно хорошо соответствуют эволюционным трекам PEGASE2 с непрерывным звездообразованием. Диапазон времен от начала эпохи звездообразования  $T_{\text{SF}}$  (или, в других терминах, возрастов галактик) очень широк — примерно от 1 до 14 млрд лет. Значительное большинство этих галактик лучше соответствует трекам с IMF Kroupa. У подавляющего большинства объектов цвета внешних частей соответствуют типичным для галактик возрастам —  $T \sim 10\text{--}13$  Gyr. Однако, для 7-ми объектов цвета их внешних областей соответствуют временам  $T_{\text{SF}}$  только приблизительно 1–3.5 Gyr. Еще для 6-ти галактик цвета соответствуют промежуточным временам  $T_{\text{SF}} \sim 4\text{--}6.5$  Gyr. Мы обсудим эти галактики и их особенности более подробно в следующем разделе.

Лишь для 4-х галактик: J0744+2506, IC 2450, J0928+2845, CGCG 035–007, в отличие от остальных 77-ти, их довольно красные цвета ( $g - r \sim 0.5\text{--}0.6$ ) можно интерпретировать как результат достаточно короткого («одномоментного») и очень старого эпизода (примерно 10 млрд лет) звездообразования, характерного для эллиптических галактик. Однако их морфология не согласуется с таким предположением. Наличие эмиссионных областей, либо вблизи центра, как для J0744+2506 и IC 2450, либо смещенных к краю, как у J0928+284 и CGCG 035–007, указывает на

относительно недавнее звездообразование, связанное либо с внешним возмущением, либо с втеканием свежего газа. Как объекты с нетипичными для исследуемой выборки цветами внешних частей, эти галактики заслуживают более детального исследования. В частности, важно было бы понять, какая доля более слабых таких объектов может оставаться необнаруженной из-за наблюдательной селекции, если их звездообразование не было активировано внешними причинами в последние десятки млн лет.

### 5.4. Необычные галактики войда

Для части галактик с некосмологическими временами от начала основной эпохи звездообразования (SAO 0822+3542, UGC 5340 = DDO 68, J0926+3343, J0723+3622, J0723+3624, J0737+4724) их необычные свойства уже были отмечены в статьях, посвященных отдельным галактикам этого войда [17, 18, 41–44].

Здесь для этих галактик мы даем независимое подтверждение голубых цветов периферии, что соответствует небольшим временам от начала непрерывного звездообразования —  $T_{\text{SF}} \lesssim 3.5$  Gyr. Еще для 2-х галактик — UGC 3966, UGC 4117 — такие данные получены впервые. Для галактик UGC 3672, UGC 3860, J0812+4836, J0929+2502, UGC 5272 и ее спутника UGC 5272b, цвета внешних частей также соответствуют некосмологическим временам в диапазоне  $T_{\text{SF}} \sim 3\text{--}6.5$  Gyr.

В таблице 2 дается сводка эволюционных параметров для 8-ми галактик, которые по сумме свойств можно отнести к эволюционно-молодым. В них массовая доля газа составляет 94–99.7%, металличность  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$  в 2–5 раз ниже, чем у типичных иррегулярных карликовых галактик такой же светимости, но населяющих области со средней или повышенной плотностью галактик (см. [41–45]), и вместе с тем цвета видимого старого звездного населения соответствуют эпохе начала звездообразования  $T_{\text{SF}} \lesssim 1\text{--}5$  Gyr. К этой же группе галактик мы относим упомянутую выше J0723+3624 с  $M_B = -9.57$ . Галактика UGC 4117, хотя и показывает голубые цвета периферии, соответствующие  $T_{\text{SF}} \sim 2$  Gyr, выпадает из списка



необычных галактик войда, так как ее металличность  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ , равная 7.82, не слишком сильно отличается от ожидаемой для ее светимости ( $M_B = -15.6$ ). То же самое относится к галактикам UGC 3672, UGC 3860, UGC 5272 и UGC 5272b, с возрастными периферии 5–6 Гуг. Для UGC 5340 (DDO 68) новые данные с космического телескопа HST [46] подтверждают предположения Пустильника и др. [42], Экты и др. [47] о том, что эта галактика состоит из двух сливающихся компонентов с очень отличающимися свойствами, что необходимо учитывать при включении этого объекта в группу необычных галактик. Более массивная центральная компонента с  $M_B \sim -16$  имеет металличность звезд в пять раз меньше солнечной и старое звездное население, т.е. является достаточно типичной галактикой позднего типа. Значительно менее массивная компонента (UGC 5340b), вытянутая вдоль восточного края более массивной компоненты, имеет металличность звезд не более чем  $Z_{\odot}/20$ , что согласуется с оценкой металличности газа  $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 7.14$  по ее H II областям. Подавляющая часть или все ее звезды имеет возраста не более 2 Гуг. Однако оценить массу или светимость менее массивной компоненты пока не представляется возможным.

Более внимательный анализ свойств упомянутых выше самых необычных галактик войда позволяет предположить, что их доля значимо выше среди галактик с более низкой светимостью. Однако это может быть и случайным результатом, связанным с малой статистикой более ярких галактик войда. Проверить правдоподобие гипотезы о связи между светимостью и долей эволюционно-молодых галактик в войде можно с помощью хорошо известного в биологии и прикладных исследованиях статистического критерия «Таблица сопряженности признаков  $2 \times 2$ » [48]). Для астрономического приложения этот критерий использовался в работе Пустильника и др. [49], где имеется его подробное описание.

Суть метода заключается в изучении чисел заполнения в таблице  $2 \times 2$ , которые соответствуют различным комбинациям двух признаков для элементов выборки. Для нашего случая мы принимаем признак  $Y$  — принадлежность к группе низкой светимости  $M_B > M_{\text{faint}}$ , где  $M_{\text{faint}}$  — выбранное из определенных соображений граничное значение. Таким образом, по признаку  $Y$  исследуемая выборка делится на  $Y$  и не- $Y$ . Аналогично, второй признак  $Z$  состоит в принадлежности к группе эволюционно-молодых галактик согласно критериям, описанным выше. Соответственно, не- $Z$  означает принадлежность к группе галактик с более стандартным видимым звездным населением. Для проверки нулевой гипотезы  $h_0$  о том, что оба признака в исследуемой выборке независимы друг

от друга, нужно составить таблицу  $2 \times 2$ , которая выглядит следующим образом:

Признак	$Y$	не- $Y$	Всего
$Z$	$m$	$n - m$	$n$
не- $Z$	$M - m$	$N - n - (M - m)$	$N - n$
Всего	$M$	$N - M$	$N$

Здесь  $m$ ,  $n - m$ ,  $M - m$ ,  $N - n - (M - m)$  дают числа галактик в выборке, соответственно, с признаками  $(Y, Z)$ ,  $(\text{не-}Y, Z)$ ,  $(Y, \text{не-}Z)$ ,  $(\text{не-}Y, \text{не-}Z)$ . Как показано в книге [48] (стр. 77–78), при независимости признаков  $Y$  и  $Z$  вероятность реализации таблицы с такими числами заполнения описывается гипергеометрическим распределением, которое при  $N > 25$  хорошо приближается так называемой неполной бета-функцией  $I_x(a, b)$ , где параметры  $x$ ,  $a$ , и  $b$  выражаются через числа заполнения таблицы  $2 \times 2$  по формулам (27)–(30) на стр. 74 из книги [48] (см. также приложение в работе [49]).

Если реальной корреляции признаков низкой светимости и «малого» возраста в выборке галактик войда нет, то при наблюдаемом распределении галактик по абсолютным звездным величинам, какое бы значение пороговой величины  $M_{\text{faint}}$  мы не приняли, числа заполнения должны соответствовать относительно невысокой вероятности отклонения нулевой гипотезы.

Для более полного учета всей известной информации об эволюционно-молодых галактиках выборки войда Lynx–Cancer, при работе с таблицей независимости признаков  $2 \times 2$  мы добавили в число эволюционно-молодых объект J0723+3624 со звездной величиной  $M_B = -9.57$ . Несмотря на то, что у этой очень маленькой галактики, члена необычного триплета в центральной части войда, не удастся измерить цвета периферии, ее рекордно высокая массовая доля газа (0.997) и голубой интегральный цвет при любых разумных сценариях эволюции приводят к возрастам менее 2–3 Гуг (рис. 7 в работе [18]). С учетом сказанного, для  $M_{\text{faint}} = -13.15$  таблица  $2 \times 2$  выглядит так:

Признак	$Y$	не- $Y$	Всего
$Z$	6	12	18
не- $Z$	2	65	67
Всего	8	77	85

Расчет вероятности таблицы с этими числами заполнения по соответствующим формулам для неполной бета-функции дает значимый результат: вероятность отклонения нулевой гипотезы  $P = 0.9993$ . Интерпретация этого результата подразумевает, что имеется значимая статистическая связь между двумя признаками в том смысле, что

доля эволюционно-молодых галактик значимо выше в группе с абсолютными звездными величинами слабее  $M_{\text{faint}} = -13.15$  (простое сравнение долей 6/18 и 2/67 указывает на видимое различие более чем на порядок величины). Для данного расчета эволюционно-молодая компонента UGC 5340b включена в выборку, и ее  $M_B$  принята ярче чем  $-13.15$ . В противоположном случае уровень значимости будет еще выше.

Обнаружение такой связи имеет два важных приложения. Первое связано с пониманием физики процессов, приводящих к преимущественному появлению эволюционно-молодых галактик только среди достаточно маломассивных объектов. Второе — методическое. Обнаруженная корреляция указывает на то, что для эффективного поиска подобных объектов в войдах необходимо исследовать галактики с абсолютными звездными величинами слабее или около «порога».

Вернемся к ситуации с голубыми цветами периферии нескольких галактик, для которых параметр O/H оказывается лишь немного ниже ожидаемого для их светимости (UGC 3672, 3860, 4117, 5272 и 5272b). Эти объекты не похожи на эволюционно-молодые, но их необычные цвета требуют дополнительного обсуждения. Одной из возможностей является относительно недавнее (на шкале 2–6 млрд лет) внешнее возмущение, приведшее к повышенному темпу звездообразования, следы которого видны сейчас и во внешних областях. Действительно, для галактик UGC 3672, UGC 3860, UGC 4117 и пары UGC 5272/5272b их оптическая морфология указывает на значительное возмущение и/или текущее взаимодействие. Дополнительное картографирование этих объектов в линии H I должно дать более веские свидетельства их возмущенного состояния.

## 6. ВЫВОДЫ

Суммируя проведенные исследования галактик войда, включая их статистический анализ и сравнение с другими данными и выборками, мы формулируем следующие результаты и выводы.

(1) Для 85-ти галактик войда Lupx–Cancer по изображениям из базы данных SDSS получены фотометрические параметры в фильтрах  $u, g, r, i$ , (полные звездные величины и цвета, эффективные радиусы и соответствующие поверхностные яркости, оптические радиусы и радиусы Холмберга). По результатам анализа радиальных профилей поверхностной яркости получены центральные поверхностные яркости и масштабные длины модельных дисков.

(2) Цветовые индексы  $(u - g), (g - r), (r - i)$  внешних частей галактик вне областей недавнего звездообразования сопоставлены с эволюционными треками пакета PEGASE2, и получены оценки времени  $T_{\text{SF}}$ , прошедшего с начала эпохи звездообразования. Для порядка 85% всех галактик эти времена находятся в диапазоне  $T \sim 10$ –13 млрд лет, типичном для галактик в более плотном окружении. Для 13-ти галактик их цвета приводят к существенно меньшим  $T_{\text{SF}}$ . Для 7-ми они находятся в диапазоне примерно 1–3.5 млрд лет, а для 6-ти остальных — приблизительно 4–6.5 млрд лет.

(3) Среди галактик с необычными цветами внешних областей большинство имеют очень низкие значения металличности газа ( $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \lesssim 7.4$ , что в 2–5 раз ниже ожидаемой для их светимости) и наибольшие значения эмпирического параметра содержания газа  $\mathcal{M}(\text{H I})/L_B \gtrsim 2.5$ . Оценивая массы звезд для этой группы галактик, мы находим их массовую долю газа в диапазоне 94–99%, что является максимальным из всех известных. По своим свойствам эти галактики являются эволюционно-молодыми.

(4) Сравнение статистических связей между наблюдаемыми параметрами галактик войда Lupx–Cancer и галактик из выборки Equatorial Survey (ES), отобранных исходно по их излучению в линии H I, показывает схожесть выборок в общем диапазоне светимостей. Однако среди галактик войда имеется значимая часть, которая выпадает из общих закономерностей. Небольшая группа так называемых «рудиментарных» галактик обзора ES также имеет необычные свойства. Более детальное исследование, вероятно, покажут, какая их часть являются аналогами необычных галактик войдов.

(5) Группа эволюционно-молодых галактик составляет около 15% всех карликовых галактик низкой поверхностной яркости войда и представлена значимо чаще среди галактик низкой светимости ( $M_B > -13.2$ ), где их доля достигает приблизительно 30%. Это является свидетельством в пользу предсказываемого более сильного влияния окружения на менее массивные галактики и указанием к эффективному поиску таких необычных галактик.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Д. И. Макарову за многочисленные полезные критические замечания и предложения, которые позволили существенно

улучшить статью. Ю. А. Перепелицына и С. А. Пустильник признательны за поддержку этой работы грантами РФФИ 11-02-00261, 13-02-90407, 13-02-90734 и частичную поддержку в рамках ФЦП «Кадры» (заявка 2012-1.5-12-000-1011-004, номер соглашения 8523). А. Ю. Князев признателен за поддержку от Национального исследовательского фонда (NRF) Южной Африки. Мы признательны консорциуму SDSS за спектральную, фотометрическую и вспомогательную информацию по изучаемым галактикам, доступную в базе данных SDSS [20].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Jöeveer, J. Einasto, and E. Tago, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **185**, 357 (1978).
2. R. P. Kirshner, A. Oemler Jr., P. L. Schechter, and S. A. Shectman, *Astrophys. J.* **248**, L57 (1981).
3. A. D. Montero-Dorta and F. Prada, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **399**, 1106 (2009).
4. V. de Lapparent, in *Proc. Les Houches Summer School, Session LX, Cosmology and Large Scale Structure*, Ed. by R. Schaeffer, J. Silk, M. Spiro, and J. Zinn-Justin (Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam, 1996), p. 107.
5. P. J. E. Peebles, *Astrophys. J.* **557**, 459 (2001).
6. A. V. Tikhonov and A. A. Klypin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **395**, 1915 (2009).
7. R. R. Rojas, M. S. Vogeley, F. Hoyle, and J. Brinkmann, *Astrophys. J.* **617**, 50 (2004).
8. R. R. Rojas, M. S. Vogeley, F. Hoyle, and J. Brinkmann, *Astrophys. J.* **624**, 571 (2005).
9. S. G. Patiri, F. Prada, J. Holtzman, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372**, 1710 (2006).
10. F. Hoyle, M. S. Vogeley, and D. Pan, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **426**, 3041 (2012).
11. K. Kreckel, M. R. Joung, and R. Cen, *Astrophys. J.* **735**, 132 (2011).
12. J. E. Einasto, *Colloquim on Cosmic Voids*, <http://www.astro.rug.nl/~weygaert/knawvoid.program.php>
13. N. Cross and S. P. Driver, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **329**, 579 (2002).
14. J. C. Mihos, S. S. McGaugh, and W. J. G. de Blok, *Astrophys. J.* **477**, L79 (1997).
15. S. A. Pustilnik and A. L. Tepliakova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **415**, 1188 (2011).
16. S. A. Pustilnik, A. L. Tepliakova, and A. Y. Kniazev, *Astrophysical Bulletin* **66**, 255 (2011).
17. S. A. Pustilnik, J.-M. Martin, A. L. Tepliakova, and A. Y. Kniazev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **417**, 1335 (2011).
18. J. N. Chengalur and S. A. Pustilnik, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **428**, 1579 (2013).
19. K. Kreckel, E. Platen, M. A. Aragon-Calvo, et al., *Astron. J.* **144**, 16 (2012).
20. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **182**, 543 (2009).
21. M. Fioc, B. Rocca-Volmerange, [arXiv:astro-ph/9912179](http://arXiv:astro-ph/9912179) (1999).
22. D. A. Garcia-Appadoo, A. A. West, J. J. Dalcanton, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **394**, 340 (2009).
23. M. J. Meyer, M. A. Zwaan, R. L. Webster, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **350**, 1195 (2004).
24. M. P. Haynes, R. Giovanelli, A. M. Martin, et al., *Astrophys. J.* **142**, 170 (2011).
25. D. G. York, J. Adelman, J. E. Anderson, et al., *Astron. J.* **120**, 1579 (2000).
26. A. Y. Kniazev, E. K. Grebel, S. A. Pustilnik, et al., *Astron. J.* **127**, 704 (2004).
27. R. Lupton, <http://www.sdss.org/dr7/algorithm/sdssUBVRITransform.html#Lupton2005>
28. E. Holmberg, *Lund Medd. Astron. Obs. Ser.* **136**, 1 (1958).
29. J. L. Sersic, *Boletin de la Asociacion Argentina de Astronomia* **6**, 99 (1963).
30. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **737**, 103 (2011).
31. L. D. Matthews, J. S. Gallagher, W. van Driel, *Astron. J.* **118**, 2751 (1999).
32. P. C. van der Kruit and L. Searle, *Astron. and Astrophys.* **95**, 105 (1981).
33. S. Roychowdhury, J. N. Chengalur, I. D. Karachentsev, and E. I. Kaisina, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **436**, 104 (2013).
34. E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **121**, 161 (1955).
35. P. Kroupa, C. A. Tout, and G. Gilmore, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **262**, 545 (1993).
36. D. L. Tucker, S. Kent, M. W. Richmond, et al., *Astronomische Nachrichten* **327**, 821 (2006).
37. M. S. Roberts, *Astron. J.* **74**, 859 (1969).
38. S. Zibetti, S. Charlot, and H.-W. Rix, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **400**, 1181 (2009).
39. V. Petrosian, *Astrophys. J.* **209**, 1 (1976).
40. S. A. Pustilnik, J.-M. Martin, W. K. Huchtmeier, et al., *Astron. and Astrophys.* **389**, 405 (2002).
41. S. A. Pustilnik, A. Y. Kniazev, A. G. Pramsky, et al., *Astron. and Astrophys.* **409**, 917 (2003).
42. S. A. Pustilnik, A. Y. Kniazev, and A. G. Pramsky, *Astron. and Astrophys.* **443**, 91 (2005).
43. S. A. Pustilnik, A. L. Tepliakova, and A. Y. Kniazev, *Astronomy Letters* **34**, 457 (2008).
44. S. A. Pustilnik, A. L. Tepliakova, A. Y. Kniazev, and A. N. Burenkov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **401**, 333 (2010).
45. S. A. Pustilnik, A. G. Pramskij, and A. Y. Kniazev, *Astron. and Astrophys.* **425**, 51 (2004).
46. N. A. Tikhonov, O. A. Galazutdinova, and V. S. Lebedev, *Astronomy Letters* **40**, 1 (2014).
47. Ekta, J. N. Chengalur, and S. A. Pustilnik, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **391**, 881 (2008).
48. L. N. Bolshev and N. V. Smirnov, *Tables of Mathematical Statistics* (Nauka, Moscow, 1983) [in Russian].
49. S. A. Pustilnik, A. V. Ugryumov, V. A. Lipovetsky, et al., *Astrophys. J.* **443**, 499 (1995).

## Study of Galaxies in the Lynx–Cancer Void. IV. Photometric Properties

Yu. A. Perepelitsyna, S. A. Pustilnik, and A. Yu. Kniazev

We present the results of a photometric study of 85 objects from the updated sample of galaxies residing in the nearby Lynx–Cancer void. We perform our photometry on  $u, g, r,$  and  $i$ -band images of the Sloan Digital Sky Survey. We determine model-independent galaxy parameters such as the integrated magnitudes and colors, effective radii and the corresponding surface brightness values, optical radii and Holmberg radii. We analyze the radial surface brightness profiles to determine the central brightness values and scale lengths of the model disks. We analyze the colors of the outer parts of the galaxies and compare them with model evolutionary tracks computed using the PEGASE 2 software package. This allowed us to estimate the time  $T_{\text{SF}}$  elapsed since the onset of star formation, which turned out to be on the order of the cosmological time  $T_0$  for the overwhelming majority of the galaxies studied. However, for 13 galaxies of the sample the time  $T_{\text{SF}}$  does not exceed  $T_0/2 \sim 7$  Gyr, and for 7 of them  $T_{\text{SF}} \lesssim 3.5$  Gyr. The latter are mostly unevolved objects dominated by low-luminosity galaxies with  $M_B > -13.2$ . We use the integrated magnitudes and colors to estimate the stellar masses of the galaxies. We estimate the parameter  $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B$  and the gas mass fractions for void galaxies with known HI-line fluxes. A small subgroup (about 10%) of the gas-richest void galaxies with  $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B \gtrsim 2.5$  has gas mass fractions that reach 94–99%. The outer regions of many of these galaxies show atypically blue colors. To test various statistical differences between void galaxies and galaxies from the samples selected using more general criteria, we compare some of the parameters of void galaxies with similar data for the sample of 195 galaxies from the Equatorial Survey (ES) based on a part of the HIPASS blind HI survey. The compared samples have similar properties in the common luminosity interval  $-18.5 < M_g < -13.5$ . The faintest void galaxies differ appreciably from the ES survey galaxies. However, the ES survey also contains about 7% of the so-called “inchoate” galaxies with high  $\mathfrak{M}(\text{HI})/L_B$  ratios, most of which are located far from massive neighbors and are probably analogs of void galaxies.

Keywords: *galaxies: photometry—galaxies: fundamental parameters—galaxies: evolution*