

УДК 524.7

Д. В. Добрычева, И. Б. Вавилова, О. В. Мельник, А. А. Эльиив

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины,
ул. Академика Заболотного, 27, Киев, 03143 Украина
dariadobrycheva@gmail.com

Морфологический тип и показатели цвета галактик SDSS DR9 на $0.02 < z < 0.06$

Исследуется корреляция показателя цвета центральных галактик ($M_r < -20.7$) и их слабых галактик-соседей ($M_r \approx -20.7$) из выборки 60 561 галактик SDSS DR9, ограниченной по красному смещению и абсолютной звездной величине значениями $0.02 < z < 0.06$ и $-24^m < M_r < -19.4^m$. Для определения морфологического типа галактик применялся метод машинного обучения «случайный лес». Статистически существенная корреляция обнаружена только для пар «центральная — ближайшая соседка», у которых расстояние между компонентами меньше 100 кпк, а каждый из компонентов является галактикой раннего типа. Полученные результаты свидетельствуют в пользу иерархического сценария эволюции галактик.

Ключевые слова: галактики, галактики SDSS, морфология, показатели цвета, машинное обучение.

ВВЕДЕНИЕ

Значительный прогресс в исследованиях зависимости показателя цвета и морфологического типа галактик — важного для понимания эволюции галактик — связан с появлением больших баз данных, основанных на масштабных обзорах неба. Среди них, например, Fermi-GLAST в гамма-диапазоне [1], ROSAT в рентгеновском [64], GALAX в ультрафиолетовом [39], WISE в инфракрасном [66] спектральных диапазонах, как и в оптическом диапазоне — COSMOS (глубокий обзор неба при помощи Космического телескопа имени Хаббла) [53] и SDSS (Слоуновский цифровой обзор неба) [24, 67]. Современные

астрономические архивы и базы данных содержат информацию о миллионах небесных объектов [48], что позволяет ставить новые задачи исследований. Каталоги, созданные на основе больших обзоров, дали возможность детальнее изучить показатели цвета [7, 12, 26], темпы звездообразования [34], морфологию галактик в зависимости от окружения [4, 16, 35, 54], выявив существенные отличия для галактик ранних и поздних типов.

В соответствии с иерархическим сценарием формирования структур и с учетом важной роли малых и больших взаимодействий, эллиптические галактики, находящиеся в более тесном окружении по сравнению с галактиками поздних морфологических типов, сформировались благодаря слиянию галактик поздних типов. Например, в работе [5] на основе численного моделирования показано, что слияние галактик поздних типов может объяснить известное соотношение «цвет — звездная величина» для эллиптических галактик. Дополнительным наблюдательным подтверждением этому служит и известная корреляция между морфологическим типом и плотностью окружения как нормальных галактик [19], так и карликовых галактик низкой поверхностной яркости [31—33], которая проявляется и на масштабах от малонаселенных групп до скоплений галактик [28, 34, 36, 44, 46, 59, 65]. В пользу иерархического сценария говорит то, что на малых красных смещениях наблюдается больше галактик ранних типов, чем в далекой Вселенной на больших красных смещениях, т. е. наблюдается эволюция бимодальности показателей цвета [13, 16, 56].

Пары галактик, будучи устойчивыми гравитационно-связанными системами, являются важным объектом таких исследований. Например, в работе [40] на основе данных DEEP2 Redshift Survey были промоделированы различные типы слияния обогащенных и обедненных газом галактик (голубые и красные соответственно) в близких парах, и получена оценка темпа образования новой галактики приблизительно $10^{-3} h^3$ в одном кубическом мегапарсеке в течение одного миллиарда лет для диапазона красных смещений $0.1 < z < 1.2$. Оказалось, что галактики ранних типов (красные) количественно преобладают над голубыми галактиками, при этом на $z = 0.1$ среди этих пар можно выделить такое распределение типов слияния: 31 % «влажных» (обогащенных газом) слияний голубых галактик (wet mergers), 25 % «сухих» (обедненных газом) слияний красных галактик (dry mergers) и 44 % слияний смешанного типа (mixed mergers), а на $z = 1.1$ распределение типов слияний кардинально отличается (68, 8 и 24 % соответственно). Отметим, что в результате слияния «влажного» и/или смешанного типа формируются галактики ранних типов со средними значениями масс, а слияния «сухого» типа ведут к образованию массивных эллиптических галактик, при этом образовавшаяся галактика не нарушает соотношений фундаментальной плоскости [23].

Изучение корреляции свойств центральных галактик и их галактик-соседей важно при выборе эволюционного сценария формирова-

ния галактик. В нашей работе [16] было показано, что на малых красных смещениях доля галактик ранних типов среди ярких центральных галактик больше (78 %) по сравнению с выборкой галактик-спутников. Это объясняется тем, что галактики ранних типов имеют в среднем большую светимость, и подтверждает тот факт, что галактики с наибольшей светимостью находятся в более плотном окружении, чем менее яркие галактики. Отметим, что вопрос коэволюции центральных галактик и галактик-спутников по-прежнему остается открытым. Например, в работах [4, 16, 36, 54, 56, 59] получено, что центральные галактики и галактики-спутники эволюционируют по-разному и только для тесных систем влияние окружения становится значимым. И наоборот — были найдены корреляции свойств центральных галактик и их спутников, говорящие об их совместной эволюции [25].

Главной целью данной работы является выявление и изучение взаимосвязей «морфология — показатель цвета» центральных галактик и их соседей, выделенных методом мозаики Вороного на основе созданной нами выборки галактик из SDSS DR9 (HyperLEDA, Ref.ID 52204) на красных смещениях $0.02 < z < 0.06$. Для автоматической морфологической классификации галактик на ранние (E + S0) и поздние (S + Irr) типы мы применили методы машинного обучения. Ниже описываются критерии отбора в пары галактик «центральная галактика — галактика-соседка», анализируются показатели цвета центральных галактик и их ближайших слабых соседних галактик, обсуждаются полученные результаты. В статье используются космологические параметры WMAP7: $\Omega_M = 0.27$, $\Omega_k = 0.73$, $\Omega_b = 0$, $H_0 = 0.71$.

ВЫБОРКА ГАЛАКТИК

В данной работе использовалась созданная нами выборка галактик из обзора SDSS DR9, в которой для избегания эффекта селекции рассматривались диапазоны красного смещения и абсолютных звездных величин: $0.02 < z < 0.06$ и $-24^m < M_r < -19.4^m$ соответственно [15, 16]. Абсолютная звездная величина рассчитывалась по формуле

$$M_r = m_r - 5 \lg D_L - 25 K(z) - ext,$$

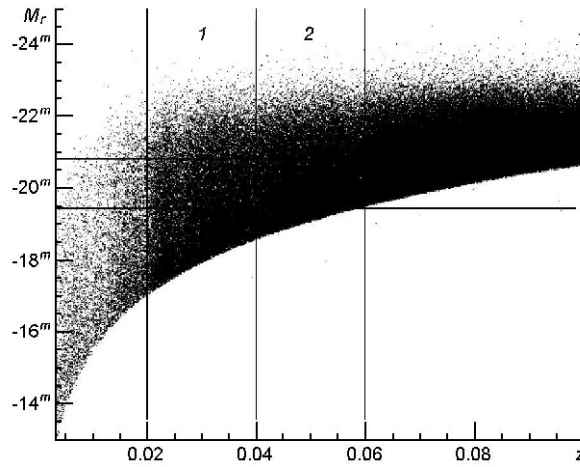
где *ext* — галактическое поглощение согласно Шлегель [52], $K(z)$ — поправка согласно работам Чилингаряна [10, 11], D_L — фотометрическое расстояние, рассчитанное с помощью программы lumdist.pro (в пакете IDL). По рекомендации SDSS для устранения типичных ошибок спектроскопии было использовано ограничение по звездной величине в *r*-полосе: $m_r < 17.7$.

После перечисленных ограничений в исследуемую выборку вошло $N = 60\,561$ галактик. В работе [16] мы показали, что а) чем выше плотность окружения центральных галактик, тем больше вероятность, что центральная галактика имеет ранний тип; б) с увеличением плот-

Рис. 1. Диаграмма «абсолютная звездная величина M_r — красное смещение» для галактик выборки SDSS DR9 на 0.003

$z < 0.1$. Центральные галактики ($M_r < -20.7^m$), слабые галактики-соседки ($M_r \sim -20.7^m$). Исследуются две выборки галактик:

- 1) $0.02 < z < 0.04$,
- 2) $0.04 < z < 0.06$



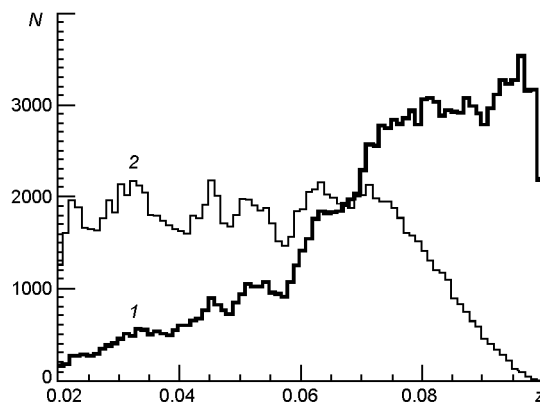
ности ранних галактик вокруг более яркой центральной галактики доля центральных галактик ранних типов увеличивается, а поздних, наоборот, уменьшается. Поэтому мы разделили нашу выборку на две подвыборки: центральные галактики ($M_r < -20.7^m$, $N = 18\,578$) и их более слабые соседи ($M_r \sim -20.7^m$, $N = 41\,983$).

Выбор величины $M_r = -20.7^m$ обусловлен эффектами наблюдательной селекции обзора SDSS DR9, который характеризуется недобором слабых галактик (см. рис. 1, где представлена зависимость красного смещения галактик выборки от абсолютной звездной величины M_r в фотометрической полосе r).

Чтобы исследовать, как изменяется зависимость «морфология — показатель цвета» центральных галактик с увеличением красного смещения, мы разбили всю выборку на две подвыборки по красному смещению. В результате у нас сформировались две подвыборки центральных галактик: 1) $0.02 < z < 0.04$, $M_r < -20.7$; 2) $0.04 < z < 0.06$, $M_r < -20.7$ (рис. 2). Галактики-соседи к этим центральным галактикам были найдены в соответствии с их красным смещением.

Для выделения систем галактик «центральная галактика — галактики-соседи» использовался 3D-метод мозаики Вороного, кото-

Рис. 2. Распределение центральных галактик — линия 1 ($M_r < -20.7^m$, $N = 120\,000$) и их более слабые соседи — линия 2 ($M_r \sim -20.7^m$, $N = 140\,000$) для галактик выборки SDSS DR9 на $0.02 < z < 0.1$



рый успешно апробирован нами для различных выборок галактик [16, 21, 42, 47]. С точки зрения математики метод мозаики Вороного — это геометрический способ решения задачи о поиске ближайшего соседа или области близости [27, 62, 68]. Пространство разбивается на объемы, в каждом из которых есть ядро; каждая точка объема ближе к данному ядру, чем к другому [21]. Для применения метода мозаики Вороного мы перешли от экваториальных координат и скоростей в сопутствующие координаты x, y, z для каждой центральной галактики из нашей выборки ($M_r < -20.7^m$). Для этого мы преобразовали величину красного смещения z в сопутствующее расстояние $D_H(z)$ для каждой галактики:

$$D_H(z) = D_H^0 \int_0^z \frac{dz}{E(z)}, \quad (2)$$

где $D_H = c/H_0$ — расстояние Хаббла, $E(z)$ — параметр Хаббла, определяющийся как

$$E(z) = \sqrt{M(1-z)^3 + k(1-z)^2}. \quad (3)$$

Координаты галактик x, y, z в сопутствующем пространстве с учетом формулы (1) рассчитываются по формулам

$$x = D_H(z) \cos(\delta) \cos(\alpha), \quad y = D_H(z) \cos(\delta) \sin(\alpha), \quad z = D_H(z) \sin(\delta), \quad (4)$$

где δ — склонение каждой галактики, α — прямое восхождение, $D_H(z)$ — сопутствующее расстояние для красного смещения z . После получения трехмерных декартовых координат галактик мы разбили геометрическое пространство, занимаемое галактиками выборки, на ячейки мозаики Вороного. В данной работе в качестве ядра ячейки Вороного выбирались галактики из двух подвыборок центральных галактик, представленных как области 1 и 2 на рис. 1 (см. подробнее в работе [16]). Потом для каждой центральной галактики ($M_r < -20.7^m, N = 18578$) мы находили ближайшие галактики из подвыборок ее более слабых соседей ($M_r < -20.7^m, N = 41\,983$, рис. 1), которые попали в поле ядра ячейки Вороного. Поскольку мы рассматривали пары, у которых светимость галактики-соседки $M_r < -20.7^m$, вариант, когда ближайшая галактика ярче центральной галактики, исключен.

В работе [45] мы применяли критерий морфологической классификации галактик по показателю цвета ($g - i$) и обратному индексу концентрации $R50/R90$. При этом критерий определялся визуально по зависимости между этими двумя величинами. Точность метода для E-типов была 96 %, а для L-типов — 67 %.

Для автоматической морфологической классификации всех галактик выборки использовался метод машинного обучения с учителем (supervised learning). Для этого мы сформировали тренировочную выборку, визуально определив морфологические типы для 764 галактик, случайно выбрав их из разных диапазонов красных смещений и светимостей исследуемой выборки. Мы классифицировали галактики на два класса: ранние — E (early types), включающие три морфологи-

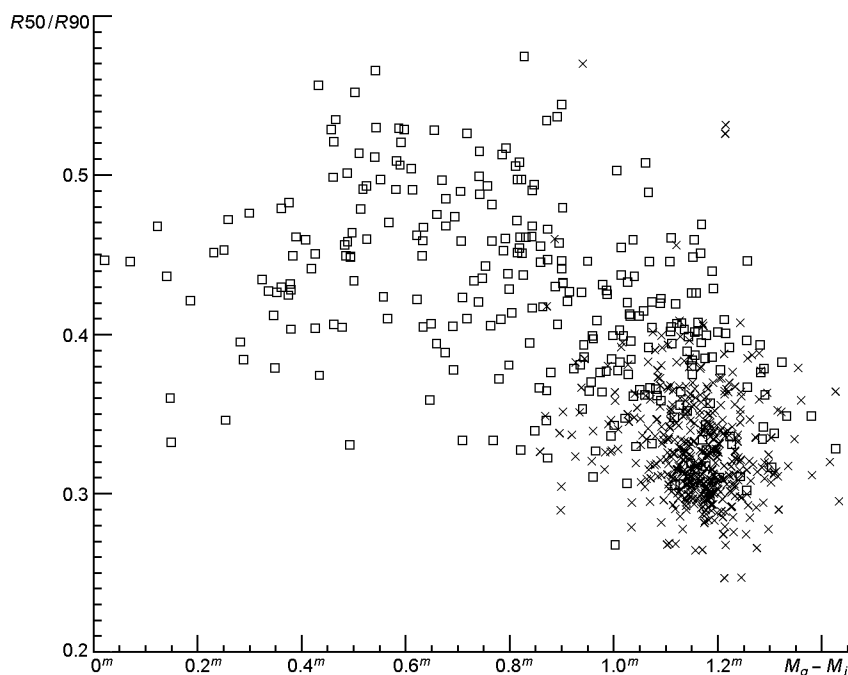


Рис. 3. Диаграмма «показатель цвета — обратный индекс концентрации» для 764 случайно выбранных галактик выборки. Крестики — ранние типы галактик, квадратики — поздние типы

ческих типа E, S0, S0a ($N = 460$); поздние — L (late types), к которым относятся галактики морфологических типов от Sa до Irr ($N = 304$).

На рис. 3 представлена диаграмма «показатель цвета ($M_g - M_i$) — обратный индекс концентрации к центру $R50/R90$ » для тренировочной выборки 764 галактик, морфологический тип которых был определен визуально. Далее для тренировки классификатора мы использовали абсолютные величины M_u , M_g , M_r , M_i и M_z , все возможные показатели цвета и обратный индекс концентрации к центру $R50/R90$.

Мы выполнили бинарную морфологическую классификацию с помощью программного обеспечения с открытым кодом KNIME Analytics Platform ver. 3.5.0, которое используется для предсказания (классификации) данных различными методами машинного обучения (machine learning) и активно применяется для анализа больших объемов данных (data science).

Сначала мы тренировали нейронную сеть RProp MLP методами «наивный байесовский классификатор» (naive Bayes classifier), «случайный лес» (random forest), и «метод опорных векторов» (support vector machine) на основе программного обеспечения WEKA 3.7. Точность этих методов была оценена с помощью метода перекрестных проверок, а именно: мы разделили тренировочную выборку на случайно выбранные пять частей, по очереди четыре из них служили тренировочными выборками, а одна — тестовой. Точность классификации определялась как среднее по тестовым выборкам. Оказалось, что метод «случайный лес» дает наивысшую точность — 91 % правильно

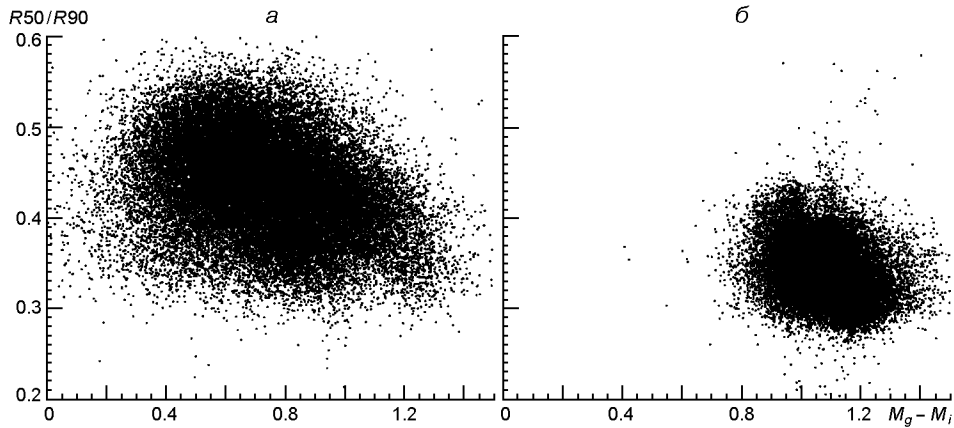


Рис. 4. Диаграмма «показатель цвета — обратный индекс концентрации» для всех 60 561 галактик выборки: *а* — галактики поздних типов ($N = 32\,362$), *б* — галактики ранних морфологических типов ($N = 28\,199$)

классифицированных морфологических типов галактик (96 % E и 80 % L). Точность остальных методов составила от 85 % до 90 %. Как уже было сказано, в нашей работе [45] точность метода для E-типов составляла 96 %, а для L-типов — 67 %, однако тренировочная выборка в тот раз у нас служила тестовой, что означает, что реальная точность была как минимум на несколько процентов ниже.

Таким образом, используя информацию об абсолютных звездных величинах, показателях цвета, обратном индексе концентрации и тренируя классификатор методом «случайный лес» для галактик, у которых морфологический тип определялся визуально, мы применили разработанные критерии к 60 561 галактики с неизвестными морфологическими типами и получили их классификацию (см. также [18]). На рис. 4 показана зависимость показателя цвета ($M_g - M_i$) от обратного индекса концентрации к центру $R50/R90$ для всей выборки галактик, морфологический тип которых был определен методом «случайный лес». Обратим внимание, что из рис. 4 ясно видна бимодальность показателей цвета галактик ранних и поздних типов.

Для изучения зависимости морфологического типа и показателя цвета центральных галактик и галактик-соседей важную роль играет фактор пространственного расстояния между галактиками. Именно это может отобразиться на ее показателе цвета [37], массе [9, 29, 30], морфологии [19, 20], кинематике [62], активности ядра [50] и других свойствах. На рис. 5 представлено распределение линейного расстояния R от центральной галактики до ближайшей галактики-соседки (жирная сплошная линия), до второй (тонкий пунктир) и до третьей галактики-соседки (штриховая линия) для двух подвыборок центральных галактик (в соответствии с рис. 1). При этом отметим, что мы не рассматриваем пекулярные скорости индивидуальных галактик, а оперируем с усредненным ансамблем пар галактик, что позволяет нивелировать эти эффекты. Взаимное расстояние между центральными

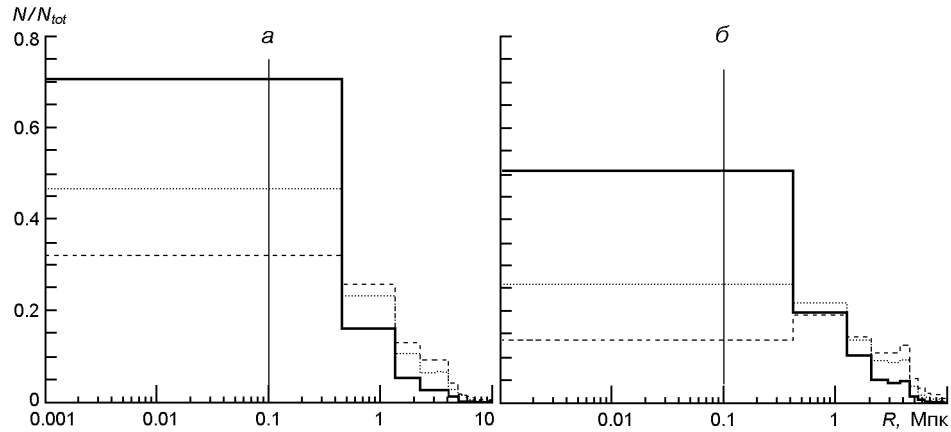


Рис. 5. Распределение галактик по значениям линейного расстояния R от центральной галактики до ближайших галактик-соседей (сплошная линия — ближайшая, пунктир — вторая, штрихи — третья): a — для подвыборки $0.02 < z < 0.04$, b — для подвыборки $0.04 < z < 0.06$ (области 1 и 2 на рис. 1)

галактиками и их слабыми соседями (x, y, z) рассчитывалось в сопутствующей системе координат (формулы (2) — (4)).

С учетом расстояния от центральной галактики до ближайших соседей, мы создали три подвыборки ее соседей, светимость которых $M_r = -20.7^m$, ранжируя их как ближайшие, вторые и третьи галактики-соседи, соответственно. При этом мы не рассматривали, является ли пара «центральная галактика — соседняя галактика» гравитационно связанной. Медианные значения расстояний (в Мпк) от центральных галактик до ближайших галактик-соседей двух подвыборок центральных галактик представлены в табл. 1. Можно проследить, что с возрастанием красного смещения увеличиваются медианные расстояния между центральными галактиками и их слабыми галактиками-соседками (т. е., пары таких галактик становятся шире), что можно объяснить эффектами селекции в выборке. Как видно, величина $R = 100$ кпк может служить достаточной мерой пространственного расстояния между галактиками на выбранных красных смещениях для их разделения на пары тесные и более широкие.

В подвыборку «центральная галактика — ближайшая соседняя галактика» вошли пары галактик, у которых расстояние R от центральной галактики до ближайшей соседней меньше 100 кпк. В подвыборку «центральная галактика — вторая соседняя галактика» вошли пары галактик, у которых соседняя галактика выбиралась из всего списка

Таблица 1. Медианные значения расстояний для центральной галактики и ее ближайших галактик-соседей

Параметры подвыборки	Первая галактика-соседка	Вторая галактика-соседка	Третья галактика-соседка
$0.02 < z < 0.04, M_r < -20.7$	0.43 Мпк	1.02 Мпк	1.49 Мпк
$0.04 < z < 0.06, M_r < -20.7$	0.81 Мпк	1.79 Мпк	2.69 Мпк

вторых галактик-соседей. В подвыборку «центральная галактика — третья соседняя галактика» вошли пары галактик, у которых соседняя галактика выбиралась из всего списка третьих галактик-соседей.

В следующем разделе мы проанализируем свойства слабых галактик-соседей, находящихся на расстояниях $R < 100$ кпк и $R > 100$ кпк от центральных галактик (см. вертикальную линию 100 кпк на рис. 5).

ЗАВИСИМОСТЬ «МОРФОЛОГИЯ — ПОКАЗАТЕЛЬ ЦВЕТА» ЦЕНТРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК И ИХ БОЛЕЕ СЛАБЫХ ГАЛАКТИК-СОСЕДЕЙ

Показатели цвета ближайшей соседки центральной галактики ($R < 100$ кпк). На рис. 6 представлены зависимости показателей цвета ($M_g - M_i$) центральной галактики и первой (ближайшей) галактики-соседки для двух подвыборок галактик (табл. 1, графа 2), когда взаимное расстояние между ними не превышает 100 кпк. Поскольку морфологический тип каждой галактики исследуемой выборки был определен, мы можем легко выделить пары галактик с различным морфологическим составом, что и отображено на рис. 6, а именно: центральная галактика и соседняя галактика имеют поздний морфологический тип (L — L), центральная галактика имеет поздний тип, а соседняя — ранний (L — E), обе галактики являются галактиками раннего типа (E — E), центральная галактика имеет ранний тип, а ближайшая соседняя галактика поздний (E — L). Из рисунка видно преобладание (E — E)-пар галактик. Для проверки этого эффекта мы сравнили реальное распределение соседних галактик со случайным, составив выборку случайных галактик-соседей следующим образом. Если у реальной центральной галактики была галактика-соседка до $R < 100$ кпк, то для нее 100 раз случайным образом выбиралась соседка из всего списка реальных соседей-галактик, а затем усреднялся показатель цвета выборки случайных соседей. В табл. 2 показано количество галактик-соседей для двух подвыборок галактик (табл. 1, графа 2), когда взаимное рас-

Таблица 2. Распределение числа первых реальных ближайших и выбранных случайным образом галактик-соседей для двух подвыборок центральных галактик

Морфологический тип пар галактик	z	Распределение реальных ближайших галактик-соседей		Распределение случайным образом выделенных ближайших галактик-соседей	
		N	\sqrt{N}	N	\sqrt{N}
L — L	0.02...0.04	35	5.92	34	5.83
	0.04...0.06	87	9.33	103	10.15
L — E	0.02...0.04	24	4.9	25	5
	0.04...0.06	62	7.87	46	6.78
E — E	0.02...0.04	174	13.19	100	10
	0.04...0.06	289	17	183	13.53
E — L	0.02...0.04	106	10.3	180	13.42
	0.04...0.06	229	15.13	335	18.3

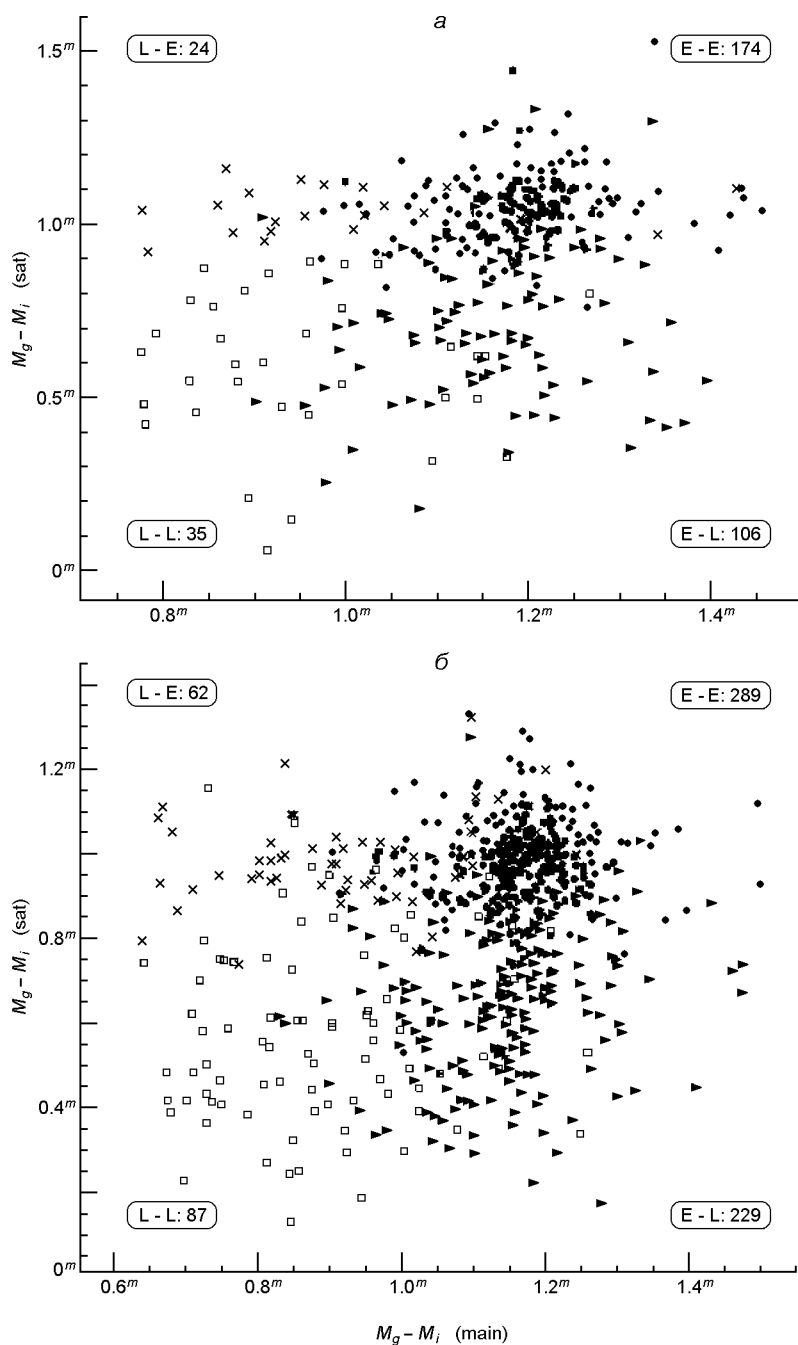


Рис. 6. Зависимости показателей цвета ($M_g - M_i$) центральной галактики и ближайшей галактики-соседки: *а* — для подвыборки $0.02 < z < 0.04$, *б* — для подвыборки $0.04 < z < 0.06$ (области 1 и 2 на рис. 1). Количественное распределение описано в табл. 2

стояние между ними не превышает 100 кпк, что отображено на рис. 6, а также количество галактик-соседок, выбранных случайным образом.

Как можно увидеть из табл. 2, для случайного распределения ближайших галактик-соседок превышение числа пар (Е — Е)-типа не

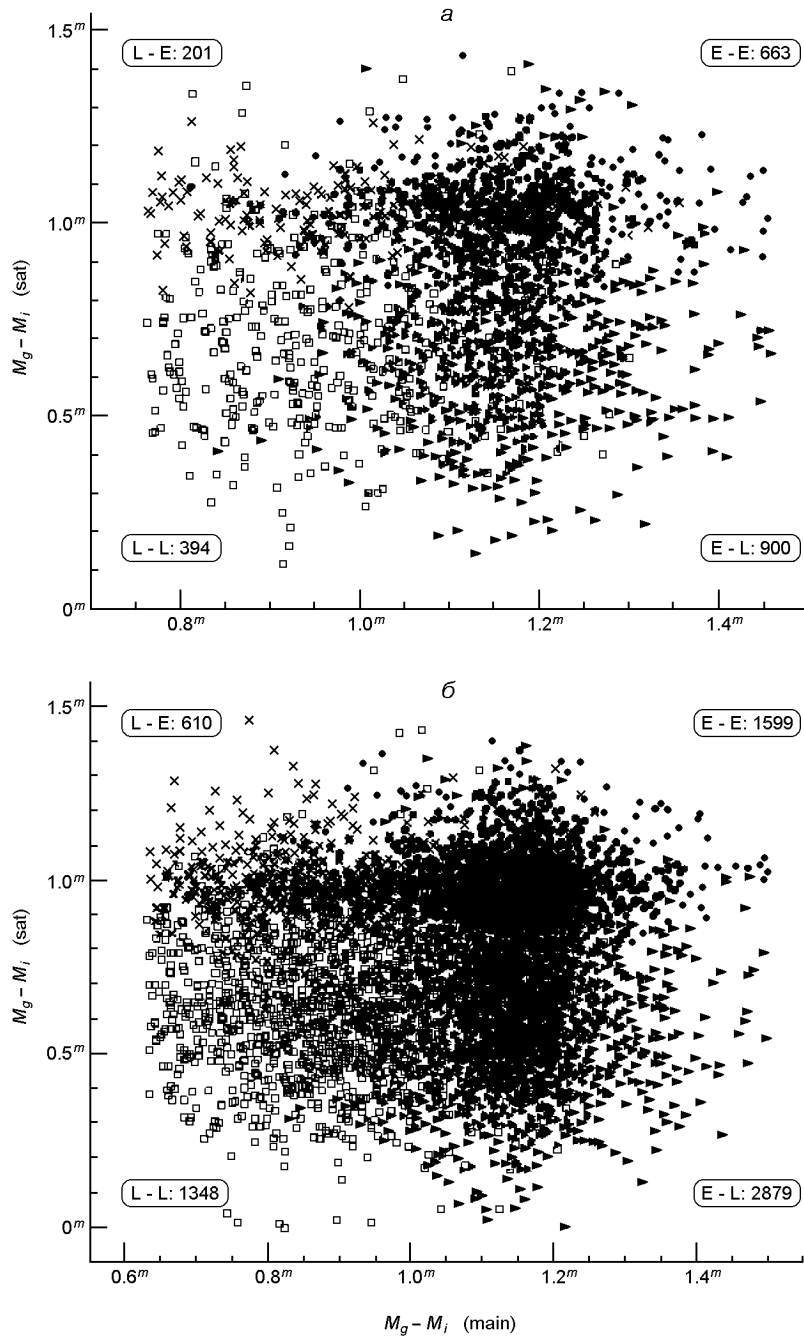


Рис. 7. Зависимости показателей цвета ($M_g - M_i$) центральной галактики и второй галактики-соседки: *а* — для подвыборки $0.02 < z < 0.04$, *б* — для подвыборки $0.04 < z < 0.06$ (области 1 и 2 на рис. 1). Количественное распределение описано в табл. 3

наблюдается. Чтобы подтвердить или опровергнуть обнаруженное преобладание (E — E)-пар галактик для реальной выборки, был использован тест Колмогорова — Смирнова. Мы сравнивали показатель цвета ($M_g - M_i$) галактик двух выборок: реальные ближайшие галактики-соседки и выбранные случайным образом (расстояние между

Таблица 3. Распределение числа первых реальных ближайших и выбранных случайным образом галактик-соседей для двух подвыборок центральных галактик

Морфолог. тип пар галактик	z	Вторая галактика-соседка				Третья галактика-соседка			
		Реальные распределения		Выделенные случайным образом		Реальные распределения		Выделенные случайным образом	
		N	\sqrt{N}	N	\sqrt{N}	N	\sqrt{N}	N	\sqrt{N}
L—L	0.02...0.04	394	19.8	475	21.7	307	17.5	357	18.8
	0.04...0.06	1348	36.7	1828	42.7	861	29.3	1171	34.2
L—E	0.02...0.04	201	14.2	120	10.9	149	12.2	99	9.9
	0.04...0.06	610	24.7	130	11.4	390	19.7	80	8.9
E—E	0.02...0.04	663	25.7	776	27.8	570	23.8	655	25.6
	0.04...0.06	1599	39.9	2121	46.1	1025	32	1360	36.9
E—L	0.02...0.04	900	30	787	28.1	731	27.1	646	25.4
	0.04...0.06	2876	53.6	2354	48.5	1887	43.4	1552	39.4

Таблица 4. Медианные значения показателя цвета галактик-соседей исследуемых подвыборок

Параметры подвыборки	Первая галактика-соседка	Вторая галактика-соседка	Третья галактика-соседка
$0.02 < z$ $0.04, M_r < -20.7$	0.89	0.85	0.86
$0.04 < z$ $0.06, M_r < -20.7$	0.78	0.77	0.76

компонентами пары меньше 100 кпк). Тест Колмогорова — Смирнова показывает корреляцию (> 3) только для пар галактик (E — E)-типов на красных смещениях $0.04 < z < 0.06$.

Показатели цвета второй и третьей соседки центральной галактики. На рис. 7 представлены зависимости показателей цвета ($M_g - M_i$) центральной галактики и второй галактики-соседки для двух подвыборок центральных галактик. Как и в случае с первой галактикой-соседкой, на этом рисунке показаны пары разных морфологических типов.

Сравнив распределение числа реальных пар «центральная галактика — вторая галактика-соседка» и «центральная галактика — третья галактика-соседка» с выбранными случайным образом для двух подвыборок, мы не нашли здесь эффекта превышения числа (E — E)-пар (или пар другого морфологического состава). Результаты данного сравнения представлены в табл. 3.

В табл. 4 приведены медианные значения показателя цвета ($M_g - M_i$) галактик-соседей. Можно увидеть, что показатель цвета для реальных ближайших галактик-соседей практически одинаковый. Мы использовали тест Колмогорова — Смирнова для подвыборок пар L — L, L — E, E — L, E — E для второй и третьей галактики-соседки и можем сказать, что медианные значения показателя цвета ($M_g - M_i$) галактик-соседей существенно не различаются.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Морфология галактик — это комплекс признаков, которые отвечают разнообразным физическим и эволюционным процессам в галактиках и вне их. К ранним морфологическим типам относятся галактики, которые имеют большую светимость и массу [6, 8]: эллиптические (E) и линзовидные галактики (S0). Поздние типы — более молодые, к ним относят спиральные галактики (S) и галактики неправильной формы (Irr) с меньшей светимостью и массой [60]. Даже визуальный анализ цветных изображений галактик в SDSS свидетельствует о различии звездного населения галактик по всей шкале морфологических типов: показатель цвета галактик в рамках классификации Хаббла от ранних типов галактик до поздних (от E до Sm) становится все более голубым, особенно начиная с морфологических типов S0/a и Sa. Качественное объяснение этому известно: показатель цвета ранних типов галактик обусловлен в основном старыми звездами (K-гиганты), в то время как показатель цвета галактик поздних типов (Sa-Sm) определяют молодые массивные звезды, сосредоточенные в спиральных рукавах и доминирующие над звездным населением балджей. При этом звездное население в эллиптических галактиках формируется намного быстрее, чем в галактиках поздних типов [58], как и темп звездообразования зависит от окружения [43, 61].

Отметим, что на взаимосвязь показателей цвета в парах галактик впервые обратил внимание Хольмберг в 1958 г., инициировав дальнейшие исследования в русле вопроса «является ли эта взаимосвязь следствием эволюции галактик в паре». Эффект Хольмберга был изучен в последние годы для больших выборок пар галактик, в том числе на основе SDSS. При этом существенных зависимостей обнаружено не было, а выявленная корреляция показателей цвета компонентов пар галактик хорошо объясняется зависимостью морфологического типа галактики от ее показателя цвета или связана со случайными вспышками звездообразования во взаимодействующих парах [2, 14, 17, 22].

Интересным является количественный анализ показателей цвета, впервые проведенный в 2001 году для более 100 тысяч галактик из обзора SDSS в работе [55] и показавший наличие значимой бимодальности в распределении показателей цвета, коррелирующей с морфологическим типом галактики. Позднее было обнаружено, что эта бимодальность присуща как галактикам с абсолютной звездной величиной $-23^m < M_r < -15.5^m$ [3], так и более слабым галактикам [6], и не характерна для ярких галактик [49]. Силкер и др. [57] показали, что учет абсолютных звездных величин в ближнем ультрафиолете еще более усиливает это бимодальное распределение, в котором особое положение занимают галактики, находящиеся в его минимуме («зеленая лужайка», green valley).

Близкие галактики поздних типов занимают достаточно широкую полосу («голубое облако», blue cloud) на диаграмме «показатель цвета ($u-r$) — абсолютная звездная величина M_r », в то время как галактики ранних морфологических типов — узкую полосу. Иными словами, галактики голубой последовательности по мере убывания темпа звездообразования эволюционируют в красную последовательность. При этом, если эволюционные изменения морфологии галактик из поздних типов в ранние сопровождаются «покраснением» (см., например, работу по проекту ZOO [54]), то изменение показателя цвета галактики не всегда свидетельствует об изменении ее морфологического типа [51]. Бимодальность показателей цвета проявляет себя и на масштабах малонаселенных групп галактик, в т. ч. пар галактик. Например, в наших работах [16, 44, 45, 63] было показано, что на сравнительно малых красных смещениях до $z < 0.1$ прослеживается тенденция эволюционной концентрации галактик ранних типов (с подавленным звездообразованием) на малых красных смещениях (см. также [61]). Недавно Крывулт с сотрудниками [38] в рамках проекта VIPERS Европейской южной обсерватории выполнили статистическое исследование возможной коэволюции морфологического типа и показателей цвета галактик на $z < 1.2$ с учетом данных об их светимости и других данных фотометрии и показали, что: 1) бимодальность показателей цвета четко прослеживается для галактик ранних и поздних типов, 2) галактики ранних типов достигают максимальной концентрации на красном смещении $z = 1$, в то время как концентрация галактик поздних типов увеличивается с космическим временем, а их небольшая эволюция показателя цвета зависит, в основном, от светимости.

В нашей работе использовалась выборка 60 561 галактик из SDSS DR9 [15, 16], а на ее основе были созданы подвыборки центральных галактик и их соседей с использованием 3D-метода мозаики Вороного в диапазоне красных смещений $0.02 < z < 0.06$. Морфологический тип галактик был определен методом машинного обучения «случайный лес», который обеспечивает точность 91 % (96 % — для ранних типов E ($N = 28\ 199$), 80 % — для поздних типов L ($N = 32\ 362$)). Тренировочная выборка включала 764 галактики с визуально определенными морфологическими типами на разных красных смещениях.

Мы сравнивали количественное распределение показателей цвета центральных галактик и их галактик-соседей различных морфологических типов с соответствующим случайным распределением. Используя тест Колмогорова — Смирнова, мы обнаружили статистически достоверную корреляцию ($> 3\sigma$) между показателями цвета и морфологическими типами только для тесных (E — E)-пар («центральная — ближайшая соседка» при $R < 100$ кпк).

Полученные нами результаты свидетельствуют в пользу иерархического сценария формирования галактик с учетом фактора слияния галактик, особенно при формировании эллиптических галактик. Наш вывод согласуется с результатами Бекки и Шиоя [5], показавши-

ми, что слияние галактик поздних типов может объяснить известное соотношение «цвет — звездная величина» для эллиптических галактик. Сопоставимый вывод получен в работе [44], где были проанализированы показатели цвета галактик в группах из обзоров 2MASS и SDSS. При сравнении их с показателями цвета изолированных галактик из каталога 2MIG было показано, что взаимосвязь «морфологический тип — показатель цвета» галактик наиболее характерна для галактик ранних типов.

Согласно так называемому «синтетическому» подходу к сценарию эволюции, внутренняя часть эллиптических галактик образовалась на больших красных смещениях, 10...12 млрд лет назад, в результате классического коллапса газового облака как целого, о чем могут свидетельствовать крутые градиенты металличности в центре галактик. Внешние же части E-галактик потом постепенно надстраивались за счет слияния (малый «мержинг») и поглощения небольших галактик-спутников, на что могут указывать пологие градиенты металличности. Относительно спиральных галактик такой сценарий подразумевает неоднократную эволюцию бара, появление и развитие которого может быть спровоцировано неоднократным приливным воздействием от соседних галактик, возмущающих осевую симметрию гравитационного потенциала диска галактики. Бимодальность в распределении показателей цвета и морфологического типа галактик, полученная в нашей работе (рис. 4), проявляет себя также и на малых красных смещениях для галактик с абсолютной звездной величиной $-24^m < M_r < -19.4^m$.

Авторы признательны В. Е. Караченцевой и проф. М. Капачиоли за ценные советы и обсуждение полученных результатов. Работа частично финансировалась в рамках Целевой комплексной программы научных космических исследований НАН Украины.

Авторы использовали данные Слоуновского цифрового обзора неба (www.sdss.org) и базы данных HyperLEDA [41].

1. Acero F., Ackermann M., Ajello M., et al. VizieR online data catalog: Fermi LAT third source catalog (3FGL) (Acero+, 2015). *VizieR Online Data Catalog* 2015. 221.
2. Allam S. S., Tucker D. L., Smith J. A., et al. Merging galaxies in the Sloan Digital Sky Survey early data release. *Astron. J.* 2004. 127. P. 1883—1899.
3. Baldry I. K., Glazebrook K., Brinkmann J., et al. Quantifying the bimodal color-magnitude distribution of galaxies. *Astrophys. J.* 2004. 600. P. 681—694.
4. Bamford S. P., Nichol R. C., Baldry I. K., et al. Galaxy Zoo: the dependence of morphology and colour on environment. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2009. 393. P. 1324—1352.
5. Bekki K., Shioya Y. Dynamics of galaxy merging and the origin of the color-magnitude relation of elliptical galaxies. *Astrophys. J.* 1997. 486. P. 197—200.
6. Bell E. F., Wolf C., Meisenheimer K., et al. Nearly 5000 distant early-type galaxies in COMBO-17: a red sequence and its evolution since $z \sim 1$. *Astrophys. J.* 2004. 608. P. 752—767.

7. Blanton M. R., Eisenstein D., Hogg D. W., Schlegel D. J., Brinkmann J. Relationship between environment and the broadband optical properties of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophys. J.* 2005. 629. P. 143—157.
8. Bundy K., Ellis R. S., Conselice C. J., et al. The mass assembly history of field galaxies: detection of an evolving mass limit for star-forming galaxies. *Astrophys. J.* 2006. 651. P. 120—141.
9. Chabrier G. Galactic stellar and substellar initial mass function. *Publs Astron. Soc. Pacif.* 2003. 115. P. 763—795.
10. Chilingarian I. V., Melchior A.-L., Zolotukhin I. Y. Analytical approximations of K-corrections in optical and near-infrared bands. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2010. 405. P. 1409—1420.
11. Chilingarian I. V., Zolotukhin I. Y. A universal ultraviolet-optical colour-colour-magnitude relation of galaxies. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2012. 419. P. 1727—1739.
12. Chuter R. W., Almaini O., Hartley W. G., et al. Galaxy environments in the UKIDSS ultra deep survey. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2011. 413. P. 1678—1686.
13. Cucciati O., Iovino A., Marinoni C., et al. The VIMOS VLT deep survey: the build-up of the colour-density relation. *Astron. and Astrophys.* 2006. 458. P. 39—52.
14. Deng X.-F., Xin Y., Peng J., Wu P. Dependence of the holmberg effect on separations between paired galaxies. *Astrophys.* 2010. 53. P. 342—350.
15. Dobrycheva D. V. The new galaxy sample from SDSS DR9 at $0.003 < z < 0.1$. *Odessa Astron. Publs.* 2013. 26. P. 187.
16. Dobrycheva D. V., Melnyk O. V., Vavilova I. B., Elyiv A. A. Environmental density vs. colour indices of the low redshifts galaxies. *Astrophys.* 2015. 58. P. 168—180.
17. Dobrycheva D. V., Vavilova I. B. No the Holmberg effect for galaxy pairs selected from the SDSS DR9 at $z \sim 0.06$. *Odessa Astron. Publs.* 2016. 29. P. 37—41.
18. Dobrycheva D. V., Vavilova I. B., Melnyk O. V., Elyiv A. A. Machine learning technique for morphological classification of galaxies at $z \sim 0.1$ from the SDSS. 2017. *arXiv:1712.08955* [astro-ph.GA].
19. Dressler A. Galaxy morphology in rich clusters - Implications for the formation and evolution of galaxies. *Astrophys. J.* 1980. 236. P. 351—365.
20. Dressler A., Oemler A., Jr., Couch W. J., et al. Evolution since $z = 0.5$ of the morphology-density relation for clusters of galaxies. *Astrophys. J.* 1997. 490. P. 577—591.
21. Elyiv A., Melnyk O., Vavilova I. High-order 3D Voronoi tessellation for identifying isolated galaxies, pairs and triplets. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2009. 394. P. 1409—1418.
22. Franco-Balderas A., Hernández-Toledo H. M., Dultzin-Hacyan D., García-Ruiz G. BVRI surface photometry of mixed morphology pairs of galaxies. I. The first data set. *Astron. and Astrophys.* 2003. 406. P. 415—426.
23. Gonzalez A., Zabludoff A., Zaritsky D. Extending the fundamental plane using intracluster light. *NOAO Proposal* 2003.
24. Gunn J. E., Carr M., Rockosi C., et al. The Sloan Digital Sky Survey photometric camera. *Astron. J.* 1998. 116. P. 3040—3081.
25. Hartley W. G., Conselice C. J., Mortlock A., Foucaud S., Simpson C. Galactic conformity and central/satellite quenching, from the satellite profiles of M^* galaxies at $0.4 < z < 1.9$ in the UKIDSS UDS. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2015. 451. P. 1613—1636.
26. Hogg D. W., Blanton M. R., Brinchmann J., et al. The dependence on environment of the color-magnitude relation of galaxies. *Astrophys. J.* 2004. 601. P. L29—L32.
27. Icke V., van de Weygaert R. The galaxy distribution as a Voronoi foam. *Quart. J. Roy. Astron. Soc.* 1991. 32. P. 85—112.

28. Karachentsev I. D. *Dvojnye galaktiki (Double galaxies)*. 1987. Nauka, Moskva, USSR. 248 p.
29. Karachentseva V. E., Karachentsev I. D., Melnyk O. V. Faint companions of isolated 2MIG galaxies. *Astrophys. Bull.* 2011. 66. P. 389—406.
30. Karachentseva V. E., Mel'nik O. V., Vavilova I. B., Makarov D. I. Triplets of galaxies in the local supercluster. 2. Virial and total masses. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies.* 2005. 21, N 3. P. 150—159.
31. Karachentseva V. E., Vavilova I. B. Clustering of low surface brightness dwarf galaxies. I. General properties. *Bull. Special Astrophys. Observ.* 1994. 37. P. 98—118.
32. Karachentseva V. E., Vavilova I. B. Clustering of dwarf galaxies with low surface brightness. II. The Virgo cluster. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies.* 1995. 11. P. 38—48.
33. Karachentseva V. E., Vavilova I. B. Clustering of dwarf galaxies with low surface brightness. III. The Fornax cluster. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies.* 1995. 11. P. 49—56.
34. Kauffmann G., White S. D. M., Heckman T. M., et al. The environmental dependence of the relations between stellar mass, structure, star formation and nuclear activity in galaxies. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2004. 353. P. 713—731.
35. Kovač K., Lilly S. J., Knobel C., et al. The 10k zCOSMOS: Morphological Transformation of Galaxies in the Group Environment Since $z \sim 1$. *Astrophys. J.* 2010. 718. P. 86—104.
36. Kovač K., Lilly S. J., Knobel C., et al. zCOSMOS 20k: satellite galaxies are the main drivers of environmental effects in the galaxy population at least to $z \sim 0.7$. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2014. 438. P. 717—738.
37. Kreckel K., Platen E., Aragón-Calvo M. A., et al. The void galaxy survey: optical properties and HI morphology and kinematics. *Astron. J.* 2012. 144., 16.
38. Krywult J., Tasca L. A. M., Pollo A., et al. The VIMOS public extragalactic redshift survey (VIPERS). The coevolution of galaxy morphology and colour to $z \sim 1$. *Astron. and Astrophys.* 2017. 598., A120.
39. Lee J. C., Gil de Paz A., Kennicutt R. C., Jr., et al. A GALEX ultraviolet imaging survey of galaxies in the local volume. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2011. 192., 6.
40. Lin L., Patton D. R., Koo D. C., et al. The redshift evolution of wet, dry, and mixed galaxy mergers from close galaxy pairs in the DEEP2 galaxy redshift survey. *Astrophys. J.* 2008. 681. P. 232—243.
41. Makarov D., Prugniel P., Terekhova N., Courtois H., Vauglin I. HyperLEDA. III. The catalogue of extragalactic distances. *Astron. and Astrophys.* 2014. 570., A13.
42. Mel'nik O. V. Interacting galaxies in sparsely populated groups. *Astron. Lett.* 2006. 32. P. 302—307.
43. Melnyk O., Karachentseva V., Karachentsev I. Star formation rates in isolated galaxies selected from the Two-Micron All-Sky Survey. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2015. 451. P. 1482—1495.
44. Melnyk O., Mitronova S., Karachentseva V. Colours of isolated galaxies selected from the Two-Micron All-Sky Survey. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2014. 438. P. 548—556.
45. Melnyk O. V., Dobrycheva D. V., Vavilova I. B. Morphology and color indices of galaxies in Pairs: Criteria for the classification of galaxies. *Astrophys.* 2012. 55. P. 293—305.
46. Melnyk O. V., Elyiv A. A., Vavilova I. B. Structure of the Local Supercluster of Galaxies Revealed by 3D Voronoi tessellation method. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies.* 2006. 22, N 4. P. 211—220.

47. Melnyk O. V., Vavilova I. B. Galaxy triplets of the local supercluster. 3. Configuration properties. *Kinematics and Phys. Celest. Bodies*. 2006. 22, N 6. P. 422—431.
48. Micaelian A. M. Astronomical Surveys and Big Data. *arXiv:1511.07322*. 2015. P. 304—310.
49. Mignoli M., Zamorani G., Scodreggio M., et al. The zCOSMOS redshift survey: the three-dimensional classification cube and bimodality in galaxy physical properties. *Astron. and Astrophys.* 2009. 493. P. 39—49.
50. Pulatova N. G., Vavilova I. B., Sawangwit U., Babyk I., Klimanov S. The 2MIG isolated AGNs - I. General and multiwavelength properties of AGNs and host galaxies in the northern sky. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2015. 447. P. 2209—2223.
51. Schawinski K., Urry C. M., Simmons B. D., et al. The green valley is a red herring: Galaxy Zoo reveals two evolutionary pathways towards quenching of star formation in early- and late-type galaxies. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2014. 440. P. 889—907.
52. Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M. Maps of dust infrared emission for use in estimation of reddening and cosmic microwave background radiation foregrounds. *Astrophys. J.* 1998. 500. P. 525—553.
53. Scoville N., Abraham R. G., Aussel H., et al. COSMOS: Hubble Space Telescope observations. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2007. 172. P. 38—45.
54. Skibba R. A., Bamford S. P., Nichol R. C., et al. Galaxy Zoo: disentangling the environmental dependence of morphology and colour. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2009. 399. P. 966—982.
55. Strateva I., Ivezić Ž., Knapp G. R., et al. Color separation of galaxy types in the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data. *Astron. J.* 2001. 122. P. 1861—1874.
56. Tal T., Dekel A., Oesch P., et al. Observations of environmental quenching in groups in the 11 Gyr since $z = 2.5$: Different quenching for central and satellite galaxies. *Astrophys. J.* 2014. 789. 164.
57. Thilker D. A., Bianchi L., Schiminovich D., et al. NGC 404: a rejuvenated lenticular galaxy on a merger-induced, blueward excursion into the green valley. *Astrophys. J.* 2010. 714. P. L171—L175.
58. Thomas D., Maraston C., Bender R., Mendes de Oliveira C. The epochs of early-type galaxy formation as a function of environment. *Astrophys. J.* 2005. 621. P. 673—694.
59. Tinker J. L., Leauthaud A., Bundy K., et al. Evolution of the stellar-to-dark matter relation: separating star-forming and passive galaxies from $z = 1$ to 0. *Astrophys. J.* 2013. 778. 93.
60. Trujillo I., Aguerri J. A. L. Quantitative morphological analysis of the Hubble Deep Field North and Hubble Deep Field South - I. Early- and late-type luminosity-size relations of galaxies out to $z \sim 1$. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2004. 355. P. 82—96.
61. van den Bosch F. C., Aquino D., Yang X., et al. The importance of satellite quenching for the build-up of the red sequence of present-day galaxies. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2008. 387. P. 79—91.
62. Vavilova I., Melnyk O. Voronoi tessellation for galaxy distribution. Mathematics and its Applications. Proceedings of the Institute of Mathematics of the NAS of Ukraine, vol. 55 (2005), Kyiv, Ukraine. In: *Voronoi's Impact on Modern Science*. Book 3. Proceedings of the Third Voronoi Conference on Analytic Number Theory and Spatial Tessellations. Eds H. Syta, A. Yurachkivsky, P. Engel, 2005. 55. P. 203—212.
63. Vavilova I. B., Melnyk O. V., Elyiv A. A. Morphological properties of isolated galaxies vs. isolation criteria. *Astron. Nachr.* 2009. 330. P. 1004.
64. Voges W., Aschenbach B., Boller T., et al. VizieR Online Data Catalog: ROSAT All-Sky Survey Faint Source Catalog (Voges+2000). *VizieR Online Data Catalog* 2000. 9029.

65. Wetzel A. R., Tinker J. L., Conroy C., van den Bosch F. C. Galaxy evolution near groups and clusters: ejected satellites and the spatial extent of environmental quenching. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2014. 439. P. 2687—2700.
66. Wright E. L., Eisenhardt P. R. M., Mainzer A. K., et al. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission description and initial on-orbit performance. *Astron. J.* 2010. 140. P. 1868—1881.
67. York D. G., Adelman J., Anderson J. E., Jr., et al. The Sloan Digital Sky Survey: Technical summary. *Astron. J.* 2000. 120. P. 1579—1587.
68. Zaninetti L. Dynamical Voronoi tessellation. II - The three-dimensional case. *Astron. and Astrophys.* 1990. 233. P. 293—300.

Статья поступила в редакцию 16.07.2018

Д. В. Добрычева, І. Б. Вавилова, О. В. Мельник, А. А. Еліїв
Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
Київ, Україна

МОРФОЛОГІЧНИЙ ТИП І ПОКАЗНИКИ КОЛЬОРУ ГАЛАКТИК SDSS DR9 НА $0.02 < z < 0.06$

Досліджується кореляція показника кольору центральних галактик ($M_r < -20.7$) і їхніх слабких сусідів ($M_r \sim -20.7$) із вибірки 60 561 галактик огляду SDSS DR9, обмеженої по червоному зміщенню та абсолютній зоряній величині значеннями $0.02 < z < 0.06$ і $-24^m < M_r < -19.4^m$. Для визначення морфологічного типу галактик застосовувався метод машинного навчання «випадковий ліс». Статистично суттєва кореляція виявлена тільки для пар «центральна — найближча сусідка», у яких відстань між компонентами менша ніж 100 кпк, а кожний із компонентів є галактикою раннього типу. Отримані результати свідчать на користь ієрархічного сценарію еволюції галактик.

Ключові слова: галактики, галактики SDSS, морфологія, показники кольору, машинне навчання.

D. V. Dobrycheva, I. B. Vavilova, O. V. Melnyk, A. A. Elyiv
Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine

MORPHOLOGICAL TYPE AND COLOR INDICES OF GALAXIES SDSS DR9 AT $0.02 < z < 0.06$

We have studied the correlations of color indices of central ($M_r < -20.7$) and their faint neighboring ($M_r \sim -20.7$) galaxies using sample based on the SDSS DR9 ($N = 60\,561$). The galaxy sample was limited by redshift $0.02 < z < 0.06$ and with absolute magnitude $-24^m < M_r < -19.4^m$. The «Random forest» method of machine learning was used for determine the morphological type of galaxies. The statistically significant correlation was found only for «central galaxies — nearest neighbor galaxy» pairs, in which the distance between components is less than 100 kpc, and each of the components is an early type galaxy. The obtained results testify to the hierarchical scenario of the evolution of galaxies.

Keywords: galaxies, the SDSS galaxies, morphology, color indices, machine learning.