

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальная
астрофизическая обсерватория Российской академии наук

На правах рукописи

УДК 524.7-1/-8



Гроховская Александра Александровна

**Исследование влияния локальной плотности
окружения на физические свойства галактик
до $z=0.8$ на основе среднеполосного
фотометрического обзора на 1-метровом
телескопе Шмидта**

Специальность 01.03.02 — «Астрофизика и звездная
астрономия»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук.

Научный руководитель: **Додонов Сергей Николаевич**
кандидат физико-математических наук,
заведующий Лабораторией Спектроскопии и Фотометрии Внегалактических Объектов САО РАН

Официальные оппоненты: **Щекинов Юрий Андреевич**,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
АКЦ ФИАН

Марчук Александр Александрович,
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник
ГАО РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится " " октября 2022 года в " " часов на открытом заседании диссертационного совета Д 002.203.01 при САО РАН по адресу: 368167, КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан " " августа 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

Шолухова О.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Прогресс в современной физике галактик, связанный с ростом числа наблюдательных данных и развитием методов численного моделирования в настоящее время не прояснил окончательно вопросы формирования и эволюции галактик - они остаются открытыми и актуальными. Многообразие форм и типов галактик свидетельствует о том, что они эволюционируют под влиянием значительного числа условий: плотность окружения, темпы аккреции внешнего вещества, внутренняя секулярная эволюция, обратный эффект от активных ядер и т.д. Каждое из этих условий, в конечном счете, влияет на темпы звездообразования в галактике, что оставляет “отпечаток” на истории звездообразования (star formation history, SFH).

Первые наблюдения галактик позволили создать морфологическую классификацию [1], а последующее изучение физических свойств галактик привело к более точной бимодальной классификации [2]. Связь между бимодальными типами галактик и их окружением впервые была обнаружена при изучении близких скоплений. В работах Омлера [3] и Дресслера [4] была обнаружена зависимость «морфология - плотность окружения». Её суть выражается в том, что дисковые галактики со звездообразованием предпочитают находиться на периферии скоплений галактик, в то время как красные эллиптические галактики в основном обнаруживаются в областях с повышенной плотностью.

Недавние работы, основанные на обзорах 2dFGRS [5] и SDSS [6; 7], показали, что связь между локальным окружением и морфологией сохраняется не только в скоплениях галактик, но существует для всего диапазона локальных плотностей вплоть до галактик поля. Кроме того, обнаружено что не только морфология, но и другие физические свойства галактик коррелируют с плотностью окружения. В работе Кауффмана [8] показано, что локальная плотность оказывает влияние на цвета, эквивалентную ширину линии H_{α} и величину скачка D4000 на масштабах порядка $1 \text{ Mpc } h^{-1}$. В работе [9] для выборки из 10,000 галактик поля COSMOS выдвинуто предположение (в согласии с более ранними работами [8; 10; 11]) о том, что более массивные галактики формировались в наиболее плотных областях раньше, чем галактики с меньшей массой, а эволюция менее массивных галактик происходит

под воздействием сложных физических процессов, определяемых их окружением.

Известное бимодальное распределение цветов галактик в близкой Вселенной ($z \leq 0.1$), обычно называемое "красной последовательностью" и "синим облаком", в основном изучалось с помощью диаграмм цвет-величина (CMD), в частности, путем анализа данных SDSS [12]. Расположение галактик на этой диаграмме коррелирует с характеристиками ее звездного населения: "красную последовательность" образуют красные, старые и богатые металлами галактики, тогда как "синее облако" в основном состоит из звездообразующих галактик с более низкой металличностью [13–18]. Эти цветовые распределения также зависят от звездной массы галактики, важного фактора в эволюции галактик (например, [19–21], причем красная последовательность заселена самыми массивными галактиками [22–25]. Цветовая бимодальность также присутствует на диаграммах цвет – звездная масса и тесно коррелирует с текущими процессами звездообразования (или SFR) и звездной массой галактик в выборке [26–32]. Несмотря на эффекты отбора и фотометрические неопределенности, бимодальность цвета была измерена на средних красных смещениях по результатам наблюдений на больших площадках, таких как BOSS, с использованием байесовской статистики [33]. Таким образом, существование этих двух групп за пределами близкой Вселенной считается возможным, и есть свидетельства того, что такое разделение может существовать уже на $z = 4$ [24; 34–37]). Для выявления распределения галактик по цветно-массовым диаграммам, а также для разделения реальной доли красных и синих галактик, важна цветовая коррекция за поглощение пылью, поскольку запыленные галактики, образующие звезды, могут иметь такие же красные цвета, как и галактики "красной последовательности" [24; 25; 38–41]. Следовательно, для идентификации и характеристики популяций галактик и их эволюции необходимо четкое разделение между отпечатком истории звездообразования и содержанием пыли.

История звездообразования в галактике сохранена в ее спектре. Исследование SFR в обзоре COSMOS [42] показало увеличение темпа звездообразования в 40 раз от $z = 0.1$ до $z = 2.5$, в зависимости от плотности окружающей среды. Особенно сильная зависимость наблюдается до $z = 1.2$. Однако, в нескольких работах [8; 43; 44] было обнаружено, что средний темп

звездообразования в галактиках, находящихся в плотном окружении, намного меньше, чем у галактик в областях с более низкой плотностью .

Элбаз [45] и Купер [46] предположили, что при $z \approx 0.8 - 1$ происходит «вырождение» связи SFR-плотность окружения (т. е. наблюдаются более высокие скорости звездообразования в галактиках при более высоких локальных плотностях). При этом в работе Патела и др. [47] такое «вырождение» для скопления галактик и его окружения отсутствует. В обзоре COSMOS [42] также не обнаруживается подобное «вырождение», которое авторы связывают с малой выборкой галактик, использованной при анализе SFR [43; 44].

Хорошо установлено, что суммарная SFR на единицу сопутствующего объема или плотности SFR (SFRD) сильно эволюционирует со временем, уменьшаясь в 20 раз от $z = 2$ до 0 [48]. В обзоре COSMOS [42] обнаружили, что SFRD равномерно распределяется между областями разной плотности при всех красных смещениях $z \leq 0.6$, в то время как ниже этого красного смещения SFRD сильно смещается к галактикам, находящимся в окружении с более низкой плотностью, что, вероятно, является результатом двух факторов: галактики в областях с высокой плотностью эволюционировали раньше, и прекращением пополнения запасов звездообразующего газа в плотных средах.

Для решения вопроса изменения физических свойств галактик с течением времени необходимы точные методы измерения красного смещения для очень больших выборок галактик. Очевидно, что использование спектроскопических красных смещений для анализа крупномасштабного распределения галактик и зависимости физических свойств галактик от плотности окружения наиболее желательны. Спектроскопия широко применялась в исследованиях на малых красных смещениях и с относительно яркими галактиками (например, в работах, основанных на данных обзора SDSS). Однако для выборок десятков и сотен тысяч галактик с большими красными смещениями, слабее, чем $I_{AB} = 22^m$, и не имеющих сильных линий излучения, это практически невозможно. Спектроскопия таких слабых галактик требует самых больших телескопов и времени экспозиции в несколько часов [49—54]. Именно поэтому фотометрические обзоры с использованием среднеполосных фильтров (COMBO-17, ALHAMBRA, COSMOS, J-PAS) становятся всё более актуальными.

Целью данной работы является изучение эволюции основных характеристик галактик в зависимости от красного смещения и плотности окружения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. На основе наблюдательных данных, полученных на 1-м телескопе Шмидта Бюраканской обсерватории (полная по потоку выборка из более 19,000 галактик ярче $R_{AB} = 22.5^m$), провести анализ крупномасштабного распределения галактик поля HS47.5-22 площадью $2.386 \square^\circ$ до красного смещения $z = 0.8$ и оценку локальной плотности, связанной с каждой галактикой.
2. Оценить основные физические параметры галактик (масса, возраст, темп звездообразования, металличность и т.д.) по наблюдениям с низким спектральным разрешением.
3. Проанализировать полученные зависимости основных физических характеристик галактик от красного смещения и плотности окружения.

Научная новизна:

1. Впервые были получены однородные наблюдательные данные для поля HS 47.5-22 площадью более $2.38 \square^\circ$.
2. Впервые получена полная по потоку выборка из более 16,000 галактик ярче $R_{AB} = 22.5^m$ на площадке более $2.38 \square^\circ$.
3. Впервые произведен анализ крупномасштабного распределения галактик поля площадью более $2.38 \square^\circ$ с использованием как традиционных математических алгоритмов - диаграмм Вороного и алгоритма определения поверхностной плотности, так и с помощью машинного обучения.
4. Впервые был произведен анализ зависимостей физических свойств галактик от красного смещения и локальной плотности окружения в поле площадью более $2.38 \square^\circ$.

Научная и практическая значимость:

1. Каталог галактик с фотометрическими красными смещениями актуален для анализа крупномасштабного распределения галактик, барионных осцилляций, а также оценки влияния плотности окружения на физические параметры галактик.
2. В связи запуском космического телескопа «Спектр-РГ», одним из приоритетных направлений наблюдений которого являются скопления галактик, возросла значимость аккуратной номенклатуры скоплений и групп галактик и сравнения их свойств в разных диапазонах электромагнитного излучения.
3. Применение методов машинного обучения к нахождению групп и скоплений галактик является наиболее современным подходом к изучению кластеризации трехмерного крупномасштабного распределения галактик.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. На основе среднеполосных фотометрических наблюдательных данных, полученных на 1-метровом телескопе Шмидта БАО НАН, составлен каталог $\sim 16,500$ галактик ярче $R_{AB} = 22.5^m$ центральной части поля HS 47.5-22 площадью $2.38 \square^\circ$. Продемонстрирована возможность определения фотометрических красных смещений с точностью $\sigma_{\text{NMAD}} < 0.0043 \cdot (z + 1)$ с использованием среднеполосных фотометрических данных телескопа метрового класса.
2. Получены оценки плотности скорости звездообразования $\text{SFRD} = -1.907 \pm 0.2 M_\odot \text{yr}^{-1} \text{pc}^{-3}$ и плотности звездной массы $\log(\rho_*) = 8.12 \pm 0.18 M_\odot \text{yr}^{-1} \text{pc}^{-3}$ для полной по массе (до $M = 10^8 M_\odot$) выборки галактик в диапазоне красного смещения $0.05 \leq z \leq 0.15$, согласующиеся с результатами известных космологических обзоров, и показывают возможности телескопов метрового класса для изучения эволюции галактик.
3. Обнаружено более 250 значимых крупномасштабных сгущений галактик, по результатам анализа трехмерного крупномасштабного распределения галактик поля HS 47.5-22 площадью $2.38 \square^\circ$ вплоть до красного смещения $z = 0.8$.

4. Установлено увеличение доли галактик красной последовательности с ростом плотности окружения до $z = 0.6$, увеличение плотности скорости звездообразования (SFRD) и снижение плотности звездной массы (SMD) с увеличением красного смещения. Данные результаты согласуются с предыдущими космологическими обзорами и показывают возможность использования телескопов метрового класса для изучения эволюции свойств звездных популяций галактик.

Апробация работы. Результаты диссертации лично представлялись диссертантом в виде докладов на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра", Москва, ИКИ РАН, 17-21.12.2017 – стендовый доклад, "Фотометрические свойства выборки галактик поля HS47.5-22", Гроховская А.А., Додонов С.Н.
2. "Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Пущино, ПРАО РАН, 24–27.04.2018, "Фотометрические свойства выборки галактик поля HS47.5-22", Гроховская А.А., Додонов С.Н.
3. "VII Пулковская молодежная астрономическая конференция", Пулково, ГАО РАН, 28-31.05.2018, "Свойства выборки галактик поля HS 47.5-22", Гроховская А.А.
4. "The role of feedback in galaxy formation: from small-scale winds to large-scale outflows", Германия, Потсдам, 02-07.09.2018 – стендовый доклад, "Photometric properties of galaxies in the HS47.5-22 field", Grokhovskaya A.A., Dodonov S.N.
5. "Instability Phenomena and Evolution of the Universe", Армения, Бюракан, 17–21.10.2018 – устный доклад, "Photometric properties of galaxies in the HS47.5-22 field", Grokhovskaya A.A., Dodonov S.N.
6. "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра", Москва, ИКИ РАН, 18-21.12.2018 – стендовый доклад, "Методы анализа крупномасштабного распределения галактик", Гроховская А.А., Додонов С.Н.
7. "Актуальные проблемы внегалактической астрономии", Пущино, ПРАО РАН, 24–26.04.2019, "Крупномасштабное распределение га-

- лактик поля HS 47.5+22: методика анализа данных", Гроховская А.А., Додонов С.Н.
8. "12th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics", Сербия, Врдник, 03-07.06.2019 – устный доклад, "Study environmental dependence of galaxy properties", Dodonov S.N., Grokhovskaya A.A.
 9. "European Week of Astronomy and Space Science", Лион, Франция, 24–28.06.2019 – стендовый доклад, , Dodonov S.N., Grokhovskaya A.A.
 10. "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра", Москва, ИКИ РАН, 17-20.12.2019 – стендовый доклад, "Крупномасштабное распределение галактик поля HS47.5-22", Гроховская А.А., Додонов С.Н.
 11. "Multi-object Spectroscopy for Statistical Measures of Galaxy Evolution Workshop", Online, 17-20.05.2021 – стендовый доклад, "The gMOSS survey: galaxies and their physical properties in 2.386 sq.deg HS47.5-22 field", Dodonov S.N., Grokhovskaya A.A.

Публикации по теме диссертации:

1. **Grokhovskaya A.**, Dodonov S.N., Movsessian T.A., Kotov S.S.; "The gMOSS: the galaxy survey and galaxy populations of the large homogeneous field", Mon. Not. R. Astron. Soc., Vol. 513, Issue 4, pp. 5973-5987 (2022)
2. Dodonov S. N., **Grokhovskaya A. A.**; "The density maps of the HS47.5-22 field", Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, Vol. 50, Issue 1, pp. 257-269 (2020)
3. **Гроховская А. А.**, Додонов С. Н.; "Крупномасштабное распределение галактик поля HS 47.5-22. II. Анализ наблюдательных данных", Астрофиз. Бюл., том 75, 3, с. 250–266 (2020)
4. **Гроховская А.А.**, Додонов С. Н.; "Крупномасштабное распределение галактик поля HS 47.5-22. I. Методика анализа данных", Астрофиз. Бюл., том 74, 4, с. 404–413 (2019)

Личный вклад автора.

В работах [1], [3] — получение наблюдательного материала на 1-м телескопе Шмидта БАО НАН и 6-метровом телескопе БТА с прибором SCORPIO-2, обработка и анализ спектроскопических и фотометрических данных, анализ эволюции различных популяций галактик в зависимости от красного смещения и плотности окружения; совместное обсуждение результатов. В работе [2], [3] — анализ трехмерного крупномасштабного распределения плотности окружения галактик, статистический анализ результатов. В работе [4] — разработка методов анализа трехмерного крупномасштабного распределения плотности окружения галактик.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Полный объем работы составляет 110 страниц с 36 рисунками и 8 таблицами. Список литературы содержит 172 наименования.

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, описывается научная новизна и практическая значимость работы. Приводится список публикаций, содержащих основные результаты исследования. Описывается апробация полученных результатов.

В **Первой главе** приводятся основные принципы астрономических среднеполосных фотометрических наблюдений, обработки наблюдательных данных, а также принципы создания среднеполосного фотометрического каталога галактик. В **разделе 1.1** даны описания развития идей среднеполосной фотометрии, приведено рассмотрение уже существующих обзоров различной глубины и площади. В **разделе 1.2** описываются особенности проведения наблюдений поля NS 47.5-22 площадью $2.38 \square^\circ$ на 1-метровом телескопе Шмидта БАО НАН, а в **разделе 1.3** дополнительных наблюдений избранных галактик поля на 6-метровом телескопе БТА с прибором SCORPIO-2, которые также были использованы в работе. Поскольку наблюдения на 1-метровом телескопе Шмидта БАО НАН стали возможными после реконструкции телескопа сотрудниками лаборатории совместно с армянскими коллегами, в разделе 1.3 кратко излагаются основные модификации оборудования. Анализ наблюдательных данных представлен в **разделе 1.4**. Методика получения среднеполосной фотометрии, включая используемое программное обес-

печение и его особенности, обсуждаются в **разделе 1.4.1**. В **разделе 1.4.2** приводится методика получения фотометрических красных смещений с помощью спектральных распределений энергии, полученных из фотометрических данных. Показана возможность достижения точности определения фотометрического красного смещения лучше $\sigma_{\text{NMAD}} < 0.0043$ с использованием данных среднеполосной фотометрии, полученной на телескопе метрового класса. **Раздел 1.4.3** посвящен обзору критериев, примененных к полной выборке объектов поля, для получения фотометрического каталога галактик, ограниченного звездной величиной $R_{AB} \leq 22.5^m$. Наблюдательные свойства полученной выборки галактик обсуждаются в **разделе 1.4.4**. В **разделе 1.5** приведено описание каталога галактик, полученного в ходе работы. Полный каталог галактик, ограниченный по звездной величине $R_{AB} \leq 22.5^m$, содержит 16,509 объектов с фотометрическими измерениями в 16 фильтрах, а также измерения высокоточных фотометрических красных смещений.

Вторая глава посвящена исследованию эволюции свойств звездных популяций галактик выборки, полученной в первой главе. В **разделе 2.1** обсуждаются свойства звездных популяций галактик выборки. **Разделы 2.1.1** и **2.1.2** посвящены аппроксимации спектральных распределений энергии галактик кодом SIGALE и оценке качества аппроксимации с помощью параметра χ^2_{reduced} . Распределения полученных свойств звездных населений показаны в **разделе 2.1.3**. Отмечается бимодальность распределения показателя цвета $(u - r)_{\text{res}}$ в системе покоя, которая указывает на две основные популяции галактик: голубое облако и красную последовательность. Для изучения различий между красной и синей популяциями галактик традиционно используется диаграмма масса - показатель цвета, результаты приведены в **разделе 2.1.4**. Точность полученных оценок физических параметров галактик приведены в **разделе 2.1.5**. Показано, что оценки точности близки к оценкам, полученным по результатам узкополосных обзоров: для возраста основного звездного населения - $\sigma(\log(\text{age})_{\text{L}}) = 0.05 \pm 0.04$, для общей массы звезд - $\sigma(\log(M)_{[M_{\odot}]}) = 0.12 \pm 0.05$ dex, для показателя цвета $(u - r)_{\text{res}}$ в системе покоя $\sigma(u - r)_{\text{res}} = 0.19 \pm 0.08$ mag, для межзвездного поглощения $\sigma(A_V) = 0.28 \pm 0.09$ mag и т.д.. Эти результаты показывают возможность использования оценок физических параметров галактик, полученных в данной работе, для изучения эволюции галактик с красным смещением.

Раздел 2.2 посвящен обсуждению вопросов эволюции галактик. В **разделах 2.2.1** и **2.2.2** описано разделение галактик на две популяции на диаграмме масса - возраст, в разделе 2.2.2 вводится поправка на поглощение для показателя цвета $(u - r)_{\text{res}}$ в системе покоя. В **разделе 2.2.3** приводятся формулы для разделения галактик на красную и синюю популяции с помощью показателя цвета $(u - r)_{\text{res}}$ в системе покоя с поправкой на поглощение. Описание физических свойств полученных популяций показано в **разделе 2.2.4**. Основные научные результаты главы находятся в **разделах 2.2.5** и **2.2.6**, где непосредственно определены плотность скорости звездообразования и плотность звездной массы для галактик массой выше $10^{8.3} M_{\odot}$ в диапазоне красного смещения $0.005 \leq z \leq 0.15$: $\text{SFRD} = -1.907 \pm 0.2 M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{pc}^{-3}$ и $\log(\rho_*) = 8.12 \pm 0.18 M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{pc}^{-3}$.

Методы анализа крупномасштабного распределения галактик обсуждаются в **Третьей главе**. **Раздел 3.1** посвящен описанию алгоритмов работы методов анализа крупномасштабного распределения галактик: диаграмм Вороного, алгоритма определения поверхностной плотности и алгоритма машинного обучения ORTICS. В **разделе 3.2** обсуждается необходимость разбиения светового конуса на тонкие слои по красному смещению из-за конечной точности определения фотометрических красных смещений. Проверка работы алгоритмов анализа крупномасштабного распределения галактик произведена в **разделе 3.3**. **Раздел 3.3.1** описывает математический формализм оценки статистических параметров работы алгоритмов. В **разделе 3.3.2** описаны данные модельных выборок галактик из симуляции светового конуса MICECAT. В **разделе 3.3.3** приведены результаты сравнения работы всех трех методов анализа крупномасштабного распределения галактик. В **разделе 3.4** описан каталог из 250 значимых крупномасштабных сгущений плотности и каталог групп галактик, состоящий из 160 групп различного богатства, поля NS 47.5-22.

Четвертая глава посвящена анализу эволюции физических свойств галактик в зависимости от плотности окружения и красного смещения. В **разделе 4.1** приводится сравнительный анализ оценок плотности окружения, полученных с помощью алгоритмов Вороного и ORTICS. В **разделе 4.2** обсуждаются цвета галактик и типы шаблонов спектрального распределения энергии. Полученные результаты показывают, что галактики ранних типов

предпочитают находиться в более плотных областях вплоть до $z \sim 0.8$. **Раздел 4.3** описывает зависимость активности звездообразования в галактиках от плотности окружения.

В **Заключении** приводится описание основных результатов, достигнутых в рамках данного исследования.

Список литературы

1. *Hubble E. P.* Extragalactic nebulae. // *ApJ*. — 1926. — дек. — т. 64. — с. 321–369. — DOI: [10.1086/143018](https://doi.org/10.1086/143018).
2. The Spectral Energy Distribution of Normal, Starburst, and Active Galaxies. / *H. R. Schmitt [и др.]* // *Astronomical Journal*. — 1997. — авг. — т. 114. — с. 592–612. — DOI: [10.1086/118496](https://doi.org/10.1086/118496). — arXiv: [astro-ph/9705114](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9705114) [[astro-ph](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9705114)].
3. *Oemler A.* The systematic properties of clusters of galaxies : PhD dissertation / *Oemler A.* — California Institute of Technology, 1974.
4. *Dressler A.* Galaxy morphology in rich clusters - Implications for the formation and evolution of galaxies // *Astrophysical Journal*. — 1980. — март. — т. 236. — с. 351–365.
5. The 2dF Galaxy Redshift Survey: galaxy clustering per spectral type / *D. S. Madgwick [и др.]* // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2003. — сент. — т. 344. — с. 847–856. — DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06861.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06861.x).
6. The Clustering of Galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Luminosity and Color Dependence and Redshift Evolution / *H. Guo [и др.]* // *The Astrophysical Journal*. — 2013. — апр. — т. 767. — с. 1–19. — DOI: [10.1088/0004-637X/767/2/122](https://doi.org/10.1088/0004-637X/767/2/122).
7. The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: modelling of the luminosity and colour dependence in the Data Release 10 / *H. Guo [и др.]* // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — янв. — т. 441. — с. 2398–2413. — DOI: [10.1093/mnras/stu763](https://doi.org/10.1093/mnras/stu763).

8. The environmental dependence of the relations between stellar mass, structure, star formation and nuclear activity in galaxies / G. Kauffmann [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2004. — сент. — т. 353. — с. 713—731. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2004.08117.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.08117.x).
9. The zCOSMOS 10k-sample: the role of galaxy stellar mass in the colour-density relation up to $z \sim 1$ / O. Cucciati [и др.] // *A&A.* — 2010. — дек. — т. 524. — A2. — DOI: [10.1051/0004-6361/200912585](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912585). — arXiv: [1007.3841](https://arxiv.org/abs/1007.3841) [[astro-ph.CO](#)].
10. The Buildup of the Red Sequence in Galaxy Clusters since $z \sim 0.8$ / G. De Lucia [и др.] // *ApJL.* — 2004. — авг. — т. 610, № 2. — с. L77—L80. — DOI: [10.1086/423373](https://doi.org/10.1086/423373). — arXiv: [astro-ph/0406454](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0406454) [[astro-ph](#)].
11. Witnessing the build-up of the colour-density relation / O. Cucciati [и др.] // arXiv e-prints. — 2006. — дек. — astro-ph/0612120. — arXiv: [astro-ph/0612120](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0612120) [[astro-ph](#)].
12. *Blanton M. R., Moustakas J.* Physical Properties and Environments of Nearby Galaxies // *Annual Review of Astron and Astrophys.* — 2009. — сент. — т. 47, № 1. — с. 159—210. — DOI: [10.1146/annurev-astro-082708-101734](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082708-101734). — arXiv: [0908.3017](https://arxiv.org/abs/0908.3017) [[astro-ph.GA](#)].
13. The dependence of star formation history and internal structure on stellar mass for 10^5 low-redshift galaxies / G. Kauffmann [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2003. — май. — т. 341, № 1. — с. 54—69. — DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06292.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06292.x). — arXiv: [astro-ph/0205070](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0205070) [[astro-ph](#)].
14. Quantifying the Bimodal Color-Magnitude Distribution of Galaxies / I. K. Baldry [и др.] // *ApJ.* — 2004. — янв. — т. 600, № 2. — с. 681—694. — DOI: [10.1086/380092](https://doi.org/10.1086/380092). — arXiv: [astro-ph/0309710](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0309710) [[astro-ph](#)].
15. The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe / J. Brinchmann [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2004. — июль. — т. 351, № 4. — с. 1151—1179. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2004.07881.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07881.x). — arXiv: [astro-ph/0311060](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0311060) [[astro-ph](#)].
16. The ages and metallicities of galaxies in the local universe / A. Gallazzi [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2005. — сент. — т. 362, № 1. —

- c. 41—58. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2005.09321.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09321.x). — arXiv: [astro-ph/0506539](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0506539) [astro-ph].
17. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - II. The bimodality of the galaxy population revisited / A. Mateus [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2006. — авг. — т. 370, № 2. — с. 721—737. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2006.10565.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10565.x). — arXiv: [astro-ph/0511578](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0511578) [astro-ph].
 18. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - IV. A nature via nurture scenario for galaxy evolution / A. Mateus [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2007. — февр. — т. 374, № 4. — с. 1457—1472. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2006.11290.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.11290.x). — arXiv: [astro-ph/0604063](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0604063) [astro-ph].
 19. The Stellar Mass Assembly of Galaxies from $z = 0$ to $z = 4$: Analysis of a Sample Selected in the Rest-Frame Near-Infrared with Spitzer / P. G. Pérez-González [и др.] // ApJ. — 2008. — март. — т. 675, № 1. — с. 234—261. — DOI: [10.1086/523690](https://doi.org/10.1086/523690). — arXiv: [0709.1354](https://arxiv.org/abs/0709.1354) [astro-ph].
 20. The Evolution of Galaxies Resolved in Space and Time: A View of Inside-out Growth from the CALIFA Survey / E. Pérez [и др.] // ApJL. — 2013. — февр. — т. 764, № 1. — с. L1. — DOI: [10.1088/2041-8205/764/1/L1](https://doi.org/10.1088/2041-8205/764/1/L1). — arXiv: [1301.1679](https://arxiv.org/abs/1301.1679) [astro-ph.CO].
 21. The star formation history of CALIFA galaxies: Radial structures / R. M. González Delgado [и др.] // A&A. — 2014. — февр. — т. 562. — A47. — DOI: [10.1051/0004-6361/201322011](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322011). — arXiv: [1310.5517](https://arxiv.org/abs/1310.5517) [astro-ph.CO].
 22. SHARDS: stellar populations and star formation histories of a mass-selected sample of $0.65 < z < 1.1$ galaxies / A. Hernán-Caballero [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2013. — сент. — т. 434, № 3. — с. 2136—2152. — DOI: [10.1093/mnras/stt1165](https://doi.org/10.1093/mnras/stt1165). — arXiv: [1306.5581](https://arxiv.org/abs/1306.5581) [astro-ph.CO].
 23. The green valley is a red herring: Galaxy Zoo reveals two evolutionary pathways towards quenching of star formation in early- and late-type galaxies / K. Schawinski [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2014. — май. — т. 440, № 1. — с. 889—907. — DOI: [10.1093/mnras/stu327](https://doi.org/10.1093/mnras/stu327). — arXiv: [1402.4814](https://arxiv.org/abs/1402.4814) [astro-ph.GA].

24. Stellar populations of galaxies in the ALHAMBRA survey up to $z \sim 1$. II. Stellar content of quiescent galaxies within the dust-corrected stellar mass-colour and the UVJ colour-colour diagrams / L. A. Diaz-Garcia [и др.] // A&A. — 2019. — нояб. — т. 631. — A156. — DOI: [10.1051/0004-6361/201832788](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832788). — arXiv: [1711.10590](https://arxiv.org/abs/1711.10590) [astro-ph.GA].
25. Stellar populations of galaxies in the ALHAMBRA survey up to $z \sim 1$. III. The stellar content of the quiescent galaxy population during the last 8 Gyr / L. A. Diaz-Garcia [и др.] // A&A. — 2019. — нояб. — т. 631. — A157. — DOI: [10.1051/0004-6361/201832882](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832882). — arXiv: [1802.06813](https://arxiv.org/abs/1802.06813) [astro-ph.GA].
26. Star Formation in AEGIS Field Galaxies since $z=1.1$: The Dominance of Gradually Declining Star Formation, and the Main Sequence of Star-forming Galaxies / K. G. Noeske [и др.] // ApJL. — 2007. — май. — т. 660, № 1. — с. L43—L46. — DOI: [10.1086/517926](https://doi.org/10.1086/517926). — arXiv: [astro-ph/0701924](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0701924) [astro-ph].
27. A Highly Consistent Framework for the Evolution of the Star-Forming “Main Sequence” from $z \sim 0-6$ / J. S. Speagle [и др.] // ApJ Supplement. — 2014. — окт. — т. 214, № 2. — с. 15. — DOI: [10.1088/0067-0049/214/2/15](https://doi.org/10.1088/0067-0049/214/2/15). — arXiv: [1405.2041](https://arxiv.org/abs/1405.2041) [astro-ph.GA].
28. *Renzini A., Peng Y.-j.* An Objective Definition for the Main Sequence of Star-forming Galaxies // ApJL. — 2015. — март. — т. 801, № 2. — с. L29. — DOI: [10.1088/2041-8205/801/2/L29](https://doi.org/10.1088/2041-8205/801/2/L29). — arXiv: [1502.01027](https://arxiv.org/abs/1502.01027) [astro-ph.GA].
29. Star formation in the local Universe from the CALIFA sample. I. Calibrating the SFR using integral field spectroscopy data / C. Catalán-Torrecilla [и др.] // A&A. — 2015. — дек. — т. 584. — A87. — DOI: [10.1051/0004-6361/201526023](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526023). — arXiv: [1507.03801](https://arxiv.org/abs/1507.03801) [astro-ph.GA].
30. Evolutionary stellar population synthesis at high spectral resolution: optical wavelengths / R. M. González Delgado [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2005. — март. — т. 357, № 3. — с. 945—960. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2005.08692.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.08692.x). — arXiv: [astro-ph/0501204](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0501204) [astro-ph].

31. Cosmic evolution of the spatially resolved star formation rate and stellar mass of the CALIFA survey / R. López Fernández [и др.] // *A&A*. — 2018. — июль. — т. 615. — A27. — DOI: [10.1051/0004-6361/201732358](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732358). — arXiv: [1802.10118](https://arxiv.org/abs/1802.10118) [[astro-ph.GA](#)].
32. Deep Extragalactic Visible Legacy Survey (DEVILS): SED Fitting in the D10-COSMOS Field and the Evolution of the Stellar Mass Function and SFR- M_* relation / J. E. Thorne [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2021. — май. — DOI: [10.1093/mnras/stab1294](https://doi.org/10.1093/mnras/stab1294). — arXiv: [2011.13605](https://arxiv.org/abs/2011.13605) [[astro-ph.GA](#)].
33. The high-mass end of the red sequence at $z \sim 0.55$ from SDSS-III/BOSS: completeness, bimodality and luminosity function / A. D. Montero-Dorta [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — сент. — т. 461, № 2. — с. 1131–1153. — DOI: [10.1093/mnras/stw1352](https://doi.org/10.1093/mnras/stw1352). — arXiv: [1410.5854](https://arxiv.org/abs/1410.5854) [[astro-ph.GA](#)].
34. Nearly 5000 Distant Early-Type Galaxies in COMBO-17: A Red Sequence and Its Evolution since $z \sim 1$ / E. F. Bell [и др.] // *ApJ*. — 2004. — июнь. — т. 608, № 2. — с. 752–767. — DOI: [10.1086/420778](https://doi.org/10.1086/420778). — arXiv: [astro-ph/0303394](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0303394) [[astro-ph](#)].
35. zCOSMOS - 10k-bright spectroscopic sample. The bimodality in the galaxy stellar mass function: exploring its evolution with redshift / L. Pozzetti [и др.] // *A&A*. — 2010. — нояб. — т. 523. — A13. — DOI: [10.1051/0004-6361/200913020](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200913020). — arXiv: [0907.5416](https://arxiv.org/abs/0907.5416) [[astro-ph.CO](#)].
36. The Evolution of the Stellar Mass Functions of Star-forming and Quiescent Galaxies to $z = 4$ from the COSMOS/UltraVISTA Survey / A. Muzzin [и др.] // *ApJ*. — 2013. — нояб. — т. 777, № 1. — с. 18. — DOI: [10.1088/0004-637X/777/1/18](https://doi.org/10.1088/0004-637X/777/1/18). — arXiv: [1303.4409](https://arxiv.org/abs/1303.4409) [[astro-ph.CO](#)].
37. The VIMOS Public Extragalactic Redshift Survey (VIPERS). Downsizing of the blue cloud and the influence of galaxy size on mass quenching over the last eight billion years / C. P. Haines [и др.] // *A&A*. — 2017. — авг. — т. 605. — A4. — DOI: [10.1051/0004-6361/201630118](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630118). — arXiv: [1611.07050](https://arxiv.org/abs/1611.07050) [[astro-ph.GA](#)].

38. Detection of Quiescent Galaxies in a Bicolor Sequence from $Z = 0-2$ / R. J. Williams [и др.] // *ApJ*. — 2009. — февр. — т. 691, № 2. — с. 1879—1895. — DOI: [10.1088/0004-637X/691/2/1879](https://doi.org/10.1088/0004-637X/691/2/1879). — arXiv: [0806.0625](https://arxiv.org/abs/0806.0625) [[astro-ph](#)].
39. Dust-corrected Colors Reveal Bimodality in the Host-galaxy Colors of Active Galactic Nuclei at $z \sim 1$ / C. N. Cardamone [и др.] // *ApJL*. — 2010. — сент. — т. 721, № 1. — с. L38—L42. — DOI: [10.1088/2041-8205/721/1/L38](https://doi.org/10.1088/2041-8205/721/1/L38). — arXiv: [1008.2971](https://arxiv.org/abs/1008.2971) [[astro-ph.CO](#)].
40. Understanding Mobility Based on GPS Data / Y. Zheng [и др.] // *Proceedings of the 10th International Conference on Ubiquitous Computing*. — Seoul, Korea : Association for Computing Machinery, 2008. — с. 312—321. — (UbiComp '08). — ISBN 9781605581361. — DOI: [10.1145/1409635.1409677](https://doi.org/10.1145/1409635.1409677). — URL: <https://doi.org/10.1145/1409635.1409677>.
41. The Age Spread of Quiescent Galaxies with the NEWFIRM Medium-band Survey: Identification of the Oldest Galaxies Out to $z \sim 2$ / K. E. Whitaker [и др.] // *ApJ*. — 2010. — авг. — т. 719, № 2. — с. 1715—1732. — DOI: [10.1088/0004-637X/719/2/1715](https://doi.org/10.1088/0004-637X/719/2/1715). — arXiv: [1006.5453](https://arxiv.org/abs/1006.5453) [[astro-ph.CO](#)].
42. Evolution of Galaxies and Their Environments at $z = 0.1-3$ in COSMOS / N. Scoville [и др.] // *ApJ Supplement*. — 2013. — май. — т. 206, № 1. — с. 3. — DOI: [10.1088/0067-0049/206/1/3](https://doi.org/10.1088/0067-0049/206/1/3). — arXiv: [1303.6689](https://arxiv.org/abs/1303.6689) [[astro-ph.CO](#)].
43. Galaxy Star Formation as a Function of Environment in the Early Data Release of the Sloan Digital Sky Survey / P. L. Gómez [и др.] // *ApJ*. — 2003. — февр. — т. 584, № 1. — с. 210—227. — DOI: [10.1086/345593](https://doi.org/10.1086/345593). — arXiv: [astro-ph/0210193](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0210193) [[astro-ph](#)].
44. The Bimodal Galaxy Color Distribution: Dependence on Luminosity and Environment / M. L. Balogh [и др.] // *ApJL*. — 2004. — нояб. — т. 615, № 2. — с. L101—L104. — DOI: [10.1086/426079](https://doi.org/10.1086/426079). — arXiv: [astro-ph/0406266](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0406266) [[astro-ph](#)].
45. The reversal of the star formation-density relation in the distant universe / D. Elbaz [и др.] // *A&A*. — 2007. — июнь. — т. 468, № 1. — с. 33—48. — DOI: [10.1051/0004-6361:20077525](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077525). — arXiv: [astro-ph/0703653](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0703653) [[astro-ph](#)].

46. The DEEP2 Galaxy Redshift Survey: the role of galaxy environment in the cosmic star formation history / M. C. Cooper [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2008. — янв. — т. 383, № 3. — с. 1058—1078. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2007.12613.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12613.x). — arXiv: [0706.4089](https://arxiv.org/abs/0706.4089) [astro-ph].
47. A Wide-field Study of the $z \approx 0.8$ Cluster RX J0152.7-1357: The Role of Environment in Galaxy Evolution / S. Patel [и др.] // American Astronomical Society Meeting Abstracts #213. т. 213. — 01.2009. — с. 315.04. — (American Astronomical Society Meeting Abstracts).
48. The Star Formation History of Mass-selected Galaxies in the COSMOS Field / A. Karim [и др.] // ApJ. — 2011. — апр. — т. 730, № 2. — с. 61. — DOI: [10.1088/0004-637X/730/2/61](https://doi.org/10.1088/0004-637X/730/2/61). — arXiv: [1011.6370](https://arxiv.org/abs/1011.6370) [astro-ph.CO].
49. The VIMOS VLT deep survey: The evolution of galaxy clustering to $z \approx 2$ from first epoch observations / O. Le Fèvre [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 2005. — т. 439, № 3. — с. 877—885. — DOI: [10.1051/0004-6361:20041962](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041962).
50. The DEEP2 Galaxy Redshift Survey: First Results on Galaxy Groups / B. F. Gerke [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2005. — т. 625, № 1. — с. 6—22. — DOI: [10.1086/429579](https://doi.org/10.1086/429579).
51. The VIMOS-VLT Deep Survey: The evolution of galaxy clustering per spectral type to $z \simeq 1.5$ / B. Meneux [и др.] // Astronomy and Astrophysics. — 2006. — т. 452, № 2. — с. 387—395. — DOI: [10.1051/0004-6361:20054571](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20054571). — eprint: [0511656](https://arxiv.org/abs/0511656) (astro-ph).
52. The DEEP2 Galaxy Redshift Survey: The relationship between galaxy properties and environment at $z \sim 1$ / M. C. Cooper [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2006. — т. 370, № 1. — с. 198—212. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2006.10485.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10485.x). — arXiv: [0603177](https://arxiv.org/abs/0603177) [astro-ph].
53. The DEEP2 Galaxy Redshift Survey: Clustering of Quasars and Galaxies at $z = 1$ / A. L. Coil [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2007. — т. 654, № 1. — с. 115—124. — DOI: [10.1086/509099](https://doi.org/10.1086/509099).

54. zCOSMOS: A Large VLT/VIMOS Redshift Survey Covering $0 < z < 3$ in the COSMOS Field / S. J. Lilly [и др.] // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2007. — т. 172, № 1. — с. 70—85. — DOI: [10.1086/516589](https://doi.org/10.1086/516589).

Гроховская Александра Александровна

Исследование влияния локальной плотности окружения на физические свойства галактик до $z=0.8$ на основе среднелосного фотометрического обзора на 1-метровом телескопе Шмидта

Подписано в печать ____ . ____ . ____ . Заказ № _____

Формат 0 × 90. Усл. печ. л.1. Тираж 100 экз.

Типография _____

