

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»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
к.ф.-м.н. Додонов С.Н.

Нижний Архыз — 2022

Оглавление

	Стр.
Введение	5
Глава 1. Методы фотометрических наблюдений	13
1.1 Развитие идей среднеполосной фотометрии	13
1.2 Наблюдения на 1-метровом телескопе Шмидта БАО НАН РА . . .	16
1.3 Наблюдения на БТА	19
1.4 Анализ наблюдательных данных	22
1.4.1 Фотометрия	22
1.4.2 Фотометрические красные смещения	27
1.4.3 Выборка галактик	28
1.4.4 Наблюдательные свойства выборки	29
1.5 Описание полученного каталога галактик	30
1.6 Выводы и результаты Главы 1	32
Глава 2. Эволюция свойств звездных популяций галактик	
выборки	36
2.1 Свойства звездных популяций в выборке галактик	36
2.1.1 Аппроксимация спектральных распределений энергии . . .	37
2.1.2 Оценка качества аппроксимации	38
2.1.3 Распределение свойств звездных населений	39
2.1.4 Диаграмма масса - показатель цвета	41
2.1.5 Оценка точности полученных свойств звездных популяций	42
2.2 Эволюция популяций галактик	43
2.2.1 Эволюция популяций галактик на диаграмме Масса-возраст	45
2.2.2 Эволюция популяций галактик на диаграмме	
масса-возраст с учетом поправки на поглощение	46
2.2.3 Разбиение выборки галактик на красную и синюю	
популяции	47
2.2.4 Описание свойств галактик красной и синей популяций . .	48
2.2.5 Плотность скорости звездообразования	50

2.2.6	Плотность звездной массы	53
2.3	Выводы и результаты главы 2	54
Глава 3. Анализ крупномасштабного распределения галактик		
	поля NS 47.5-22	56
3.1	Методы анализа крупномасштабного распределения галактик	56
3.1.1	Диаграммы Вороного	57
3.1.2	Алгоритм определения поверхностной плотности	58
3.1.3	Алгоритм машинного обучения OPTICS	60
3.1.4	Разбиение светового конуса на тонкие слои	65
3.2	Статистическая оценка результатов работы алгоритмов	65
3.2.1	Основные статистические выкладки для оценки качества работы алгоритмов	65
3.2.2	Модельные выборки галактик из симуляции светового конуса MICECAT	67
3.2.3	Результаты сравнения эффективности алгоритмов	69
3.3	Каталог групп галактик	73
3.4	Выводы и результаты Главы 3	78
Глава 4. Эволюция физических свойств галактик в зависимости от плотности окружения и красного смещения		
	79	
4.1	Сравнение плотности окружающей среды, полученной с помощью OPTICS и диаграм Вороного	79
4.2	Цвета галактик и типы шаблонов спектрального распределения энергии	82
4.3	Зависимость плотности звездообразования от плотности окружения	83
4.4	Выводы и результаты главы 4	85
Заключение		87
Список литературы		88
Приложение А. Каталог галактик поля NS 47.5-22		108

Приложение Б. Каталог групп галактик поля HS 47.5-22	109
Б.1 Каталог групп галактик поля HS 47.5-22	109
Б.2 Каталог галактик-членов групп поля HS 47.5-22	110

Введение

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 $H\alpha$ 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 га-

лактиках, 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 NS47.5-22 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 NS 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 га-

ластик, 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 сгущиваний 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", Пушкино, 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", Пушкино, ПРАО РАН, 24–26.04.2019, "Крупномасштабное распределение галактик 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.

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.

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.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Полный объем работы составляет

110 страниц с 36 рисунками и 8 таблицами. Список литературы содержит 172 наименования.

Глава 1. Методы фотометрических наблюдений

Изучение эволюции физических свойств галактик требует статистических исследований на больших выборках объектов. Для анализа крупномасштабного распределения галактик и эволюции физических свойств в зависимости от красного смещения и локальной плотности окружения наиболее предпочтительно использовать спектроскопические красные смещения. Такие работы широко проводились при исследованиях относительно ярких галактик на малых красных смещениях (например, Слоановский обзор неба [55]). Однако для выборок из десятков и сотен тысяч галактик с далекими красными смещениями, слабее $I_{AB} = 22^m$ при отсутствии сильных эмиссионных линий, это практически невозможно. Для спектроскопии таких слабых объектов требуются самые большие телескопы и времена экспозиции в несколько часов (например, в работах [49—54]). В связи с этим среднеполосные фотометрические обзоры становятся всё более востребованными.

1.1 Развитие идей среднеполосной фотометрии

Обзоры, основанные на прямых снимках неба в широкополосных фильтрах, дают информацию о морфологии и распределении энергии в спектрах всех объектов поля зрения телескопа с очень низким спектральным разрешением. Широкополосная фотометрия использовалась в обзорных работах для отбора QSO по UV-избытку [56], для отбора определенного типа объектов [57] и во многих других работах. Небольшое число фотометрических полос делает метод весьма чувствительным к вариациям наклона в спектральном распределении энергии (Spectral Energy Distribution, SED) у объектов. Информация о морфологии объектов имеет весьма ограниченное применение при классификации объектов на звёзды, галактики и квазары, т.к. сильно зависит от условий наблюдений и становится не пригодной задолго до достижения пределов фотометрии. Основной проблемой выборок АЯГ (активные ядра галактик, AGN)

созданных на основе цветовых критериев является низкая полнота выборки объектов и большие трудности при попытках учесть селекционные эффекты.

Бесщелевая спектроскопия с применением объективной призмы, гризмы или грензы - эффективная методика получения информации о большом количестве объектов с низким спектральным разрешением. Существенны и ограничения метода: при бесщелевой спектроскопии изображение объекта растягивается в спектр над фоном неба, что приводит к значимому снижению отношения сигнал/шум, а спектральное разрешение определяется монохроматическим изображением объекта [58]. Результаты наблюдений бесщелевой спектроскопии отягощены проблемами наложений порядков, переменной комой по полю зрения, а полезный спектральный диапазон для объективных призм, гризм и гренз ограничен (около 2500 Å).

Необходимость массового изучения свойств слабых объектов, недостижимых для бесщелевой спектроскопии, привела к возрождению многоцветной фотометрии на новом технологическом уровне. Впервые идея увеличения количества фильтров и использования фотометрических данных для определения красных смещений галактик была предложена и реализована [59]. Значительно позже эта идея была возрождена в работах [60] и [61].

Работы [62] и [63] были первыми, где использовались среднеполосные фильтры, покрывающие широкий спектральный диапазон. Полученные фотометрические данные рассматривали как низкодисперсионный спектр каждого наблюдаемого объекта. Для слабых объектов, многополосная фотометрия при прочих равных условиях сравнима (с точки зрения числа одновременно исследуемых объектов) по эффективности с бесщелевой спектроскопией [62]. Однако современные интерференционные фильтры могут быть изготовлены с пропусканием 90 - 95 % в широком диапазоне длин волн в то время как объективная призма, гризма или гренза имеют высокую эффективность только в области угла блеска.

После работ [64], [65], [66] многополосная фотометрия получила всеобщее признание, как метод позволяющий исследовать все объекты, видимые в поле зрения телескопа, и с приемлемой точностью определять их тип, фотометрические красные смещения, делать оценки их физических параметров. Такая методика наблюдений является промежуточной между многоцветной фотометрией и многощелевыми наблюдениями.

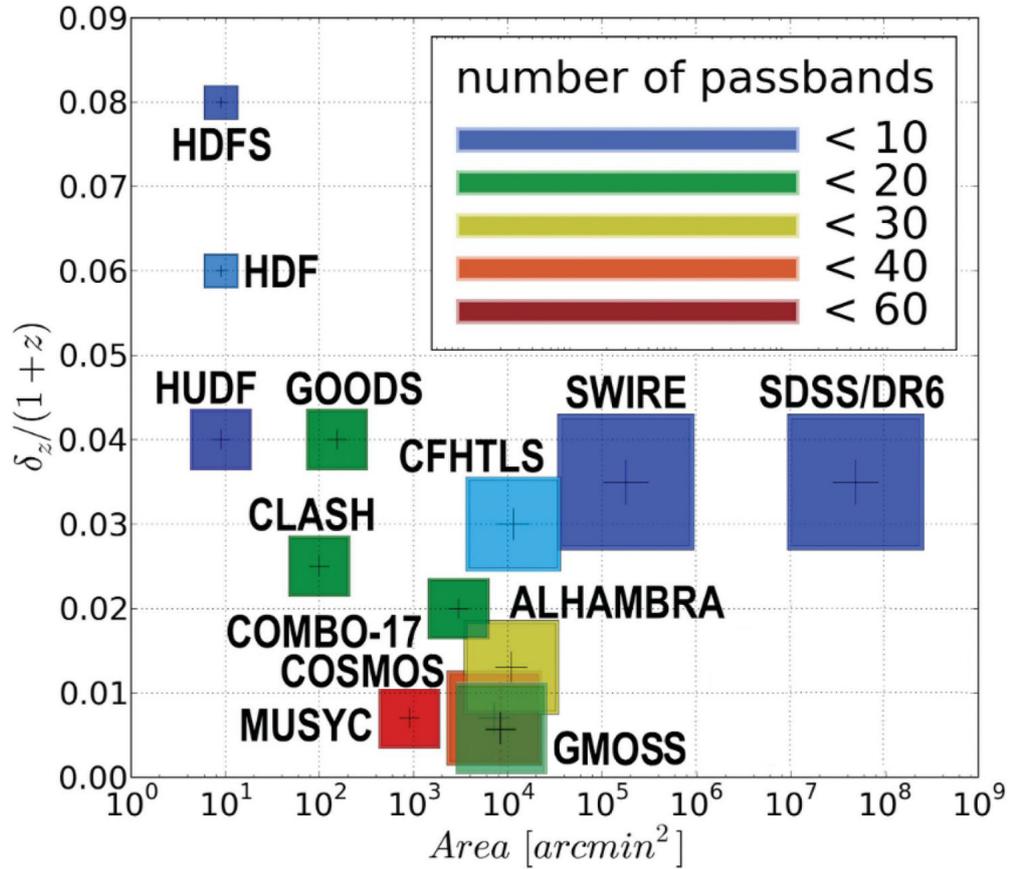


Рисунок 1.1 — Сравнение обзоров неба с фотометрическими красными смещениями. На рисунке представлена точность фотометрического красного смещения по сравнению с охваченной областью для нескольких обзоров. Количество фотометрических полос пропускания имеет цветовую маркировку, как описано в легенде. Размер маркера представляет логарифмически количество обнаруженных объектов, положение внутреннего знака плюс указывает на его фотометрическую точность красного смещения.

Существует всего лишь несколько обзоров достаточной глубины, которые позволяют решать статистические задачи изучения физических свойств галактик и крупномасштабного распределения галактик: COMBO-17 (Classifying Objects by Medium-Band Observations, a spectrophotometric 17-filter survey, суммарная площадь $\sim 0.78 \square^\circ$ [67]), ALHAMBRA (Advanced Large, Homogenous Area Medium Band Redshift Astronomical Survey, суммарная площадь $\sim 2.79 \square^\circ$ [68]), COSMOS (Cosmic Evolution Survey, суммарная площадь $\sim 2.0 \square^\circ$ [69]), miniJPASS (набор данных, подобных тем, что планируется получить в ходе обзора J-PAS (The Javalambre-Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey [70; 71]), для изучения научных возможностей обзора, суммарная площадь $\sim 1.0 \square^\circ$ [72]). Несмотря на большую суммарную площадь, практически

все эти обзоры проводились на небольших площадях (за исключением COSMOS и miniJPASS), которые значительно разнесены друг от друга. Это затрудняет изучение физических свойств галактик в зависимости от плотности окружающей среды.

Широкополосные обзоры были исключены нами из обзора ввиду низкой точности определения фотометрических красных смещений и трудностей классификации галактик по спектральному типу. Спектральные обзоры достаточной площади, такие как SDSS (Sloan Digital Sky Survey [55]) и 2dFGRS (The 2dF Galaxy Redshift Survey [73]), ограничены по глубине. Глубокие же спектральные исследования не имеют достаточной площади, кроме того такие выборки не являются полными из-за необходимости предварительного отбора объектов. Все это приводит к тому, что фотометрические исследования с использованием среднеполосных фильтров становятся все более актуальными.

1.2 Наблюдения на 1-метровом телескопе Шмидта БАО НАН РА

В работе использованы результаты наблюдений поля HS47.5-22 (Hamburg Quasar Survey, [74]), полученные нами на 1-м телескопе Шмидта Бюраканской астрофизической обсерватории НАН (Республика Армения). 1-м телескоп Шмидта БАО НАН РА является одним из самых светосильных ($F/2.1$) среди крупных шмидтовских телескопов мира. Телескоп был модернизирован в 2013–2015 годах Лабораторией спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов Специальной астрофизической обсерватории совместно с армянскими коллегами [75]. Была полностью переработана система управления телескопом: заменены исполнительные механизмы, разработано программное обеспечение для управления телескопом и система наведения.

Для наблюдений на телескопе была модернизирована ПЗС-матрица Argee-16M (США) размером $4k \times 4k$ с $RON \sim 11.1 e^-$: установлена линза поля, исправляющая кривизну фокальной поверхности, установлено жидкостное охлаждение. В октябре 2015 года детектор был установлен в фокусе телескопа. Детектор оснащен турелью с 20 среднеполосными фильтрами, равномерно покрывающими диапазон длин волн $4000\text{--}9000 \text{ \AA}$ с $FWHM = 250 \text{ \AA}$; пятью

широкополосными фильтрами системы SDSS (u , g , r , i , z); тремя узкополосными фильтрами (5000 Å, 6560 Å и 6760 Å, для всех узкополосных фильтров FWHM = 100 Å). После модернизации основными наблюдательными задачами 1-м телескопа стали поиск молодых звездных объектов, эволюция основных физических параметров галактик, крупномасштабное распределение галактик, активные ядра галактик, звездный состав дисков галактик.

Для наблюдений было выбрано поле HS 47.5-22 с координатами центра RA 09^h50^m00^s, DEC +47^d35^m00^s, которое является одним из полей рентгеновского спутника ROSAT с глубоким накоплением [74]. ROSAT (сокращение от нем. **R**öntgen**s**atellit) - рентгеновский обзор всего неба, миссия которого была завершена в 1999 году. По завершению миссии Спектр-РГ (Spectrum Röntgen-Gamma, [76]) в 2023 году ожидаются данные лучшего качества. Суммарное время экспозиции ROSAT в данном поле превышает 5000 секунд для 73% площади и более 20000 сек. для центральной области размером 2.3 □°. Предельный поток в $3.4 * 10^{-14}$ ergs cm⁻² s⁻¹ был получен для объектов в диапазоне энергий 0.1-2.4 keV. Поле HS 47.5-22 было выбрано для наблюдений спутником ROSAT из-за очень низкой плотности нейтрального водорода на луче зрения $\langle N_H \rangle = 10^{20}$ cm⁻² в направлении поля. Такое значение плотности нейтрального водорода сравнимо со значением плотности в области "дыры Локмана" [77], где наблюдается самая низкая плотность нейтрального водорода на луче зрения для северного неба $\langle N_H \rangle = 4.5 * 10^{19}$ cm⁻².

Наблюдения проводились на протяжении нескольких сетов в феврале, марте, апреле и ноябре 2017 года, а также в феврале и ноябре 2018 года в четырех широкополосных фильтрах системы SDSS (u , g , r , i) и 16 среднеполосных фильтрах равномерно покрывающими спектральный диапазон 4000–8000 Å. Набор среднеполосных фильтров с фильтром u SDSS, представлены на рис. 1.3 и в таблице 1 (совместно с широкополосными фильтрами).

Для покрытия центральной части поля, наблюдавшегося на рентгеновском спутнике ROSAT, наблюдались четыре позиции с перекрытием порядка 10 угловых минут, из которых была создана мозаика общей площадью ~ 2.386 □°. Каждая из позиций наблюдалась в 4 широкополосных фильтрах (u , g , r , i SDSS) и 16 среднеполосных фильтрах. Общее время экспозиции выбрано так, чтобы достичь глубины $t_{AB} \sim 25^m$ с отношением сигнал/шум ~ 5 в широкополосных (около 2 часов) и $t_{AB} \sim 23^m$ с отношением сигнал/шум ~ 5 в среднеполосных

Таблица 1 — Набор широкополосных и среднеполосных фильтров 1-м телескопа Шмидта БАО НАН РА. Эффективная длина волны, FWHM, предельная звездная величина, измеренная на уровне сигнал/шум ~ 5 .

Фильтр	$\lambda_{\text{cen}}, \text{\AA}$	FWHM, \AA	$m_{\text{lim}, 5\sigma}$
<i>u</i> SDSS	3578	338	24.23
<i>g</i> SDSS	4797	860	25.22
<i>r</i> SDSS	6227	770	24.97
<i>i</i> SDSS	7624	857	24.15
mb 400	3978	250	24.37
mb 425	4246	250	24.31
mb 450	4492	250	24.20
mb 475	4745	250	24.31
mb 500	4978	250	24.30
mb 525	5234	250	24.37
mb 550	5496	250	23.86
mb 575	5746	250	24.29
mb 600	5959	250	23.89
mb 625	6234	250	23.51
mb 650	6499	250	23.41
mb 675	6745	250	23.78
mb 700	7002	250	23.47
mb 725	7253	250	23.20
mb 750	7519	250	23.07
mb 775	7758	250	22.97

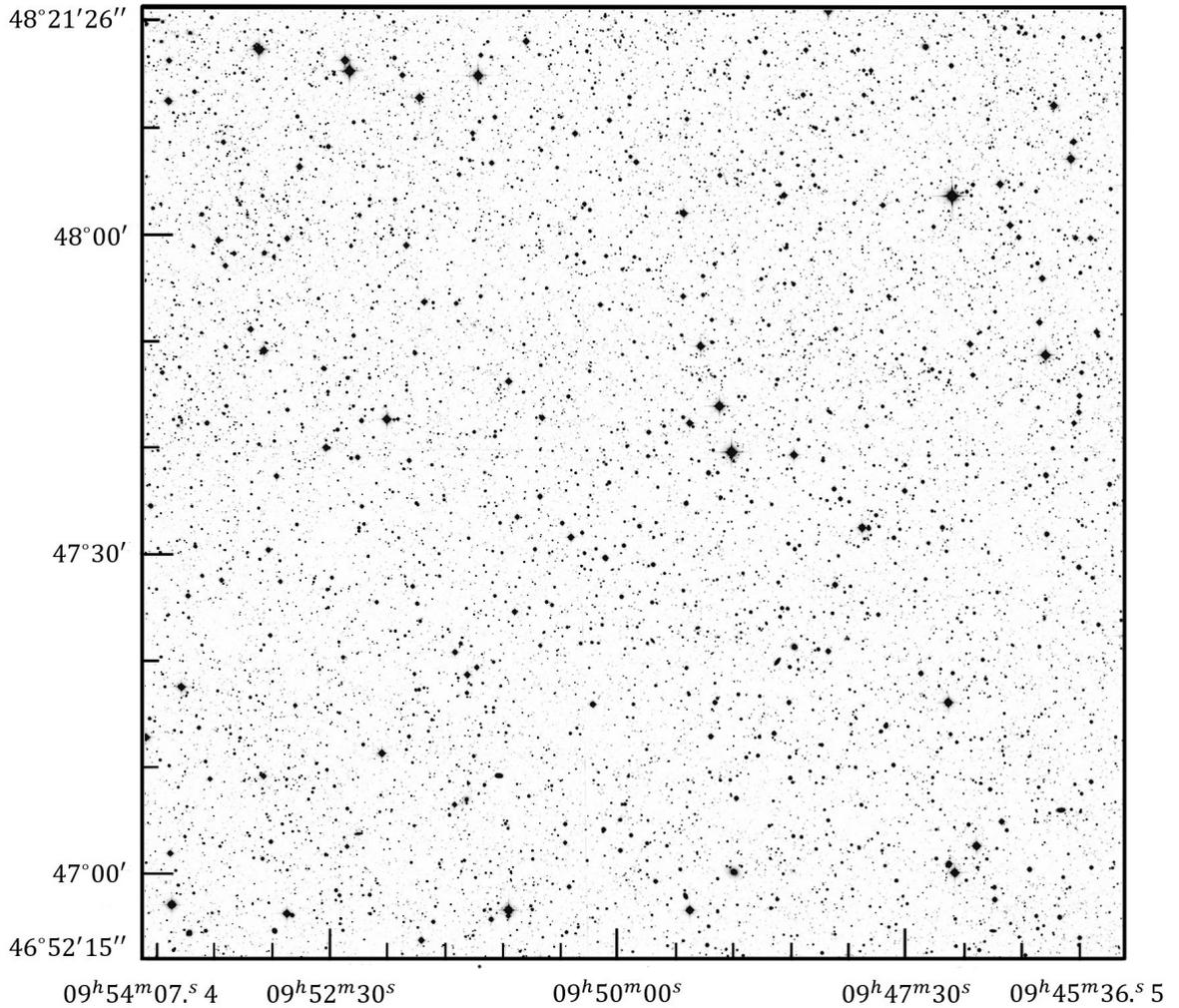


Рисунок 1.2 — Мозаика поля HS47.5-22 размером около $\sim 2.386 \square^\circ$ с координатами центра RA $09^h50^m00^s$, DEC $+47^d35^m00^s$, построенная на основе глубоких снимков ($m_{AB} \approx 25^m$) в широкополосных фильтрах g , r и i системы SDSS

фильтрах (около 60 минут на пике кривой чувствительности детектора и около 2 часов на краях диапазона).

1.3 Наблюдения на БТА

Для уточнения красного смещения и принадлежности галактик к группам были проведены спектральные наблюдения избранных галактик с длинной щелью на БТА с многорежимным редуктором первичного фокуса SCORPIO-2

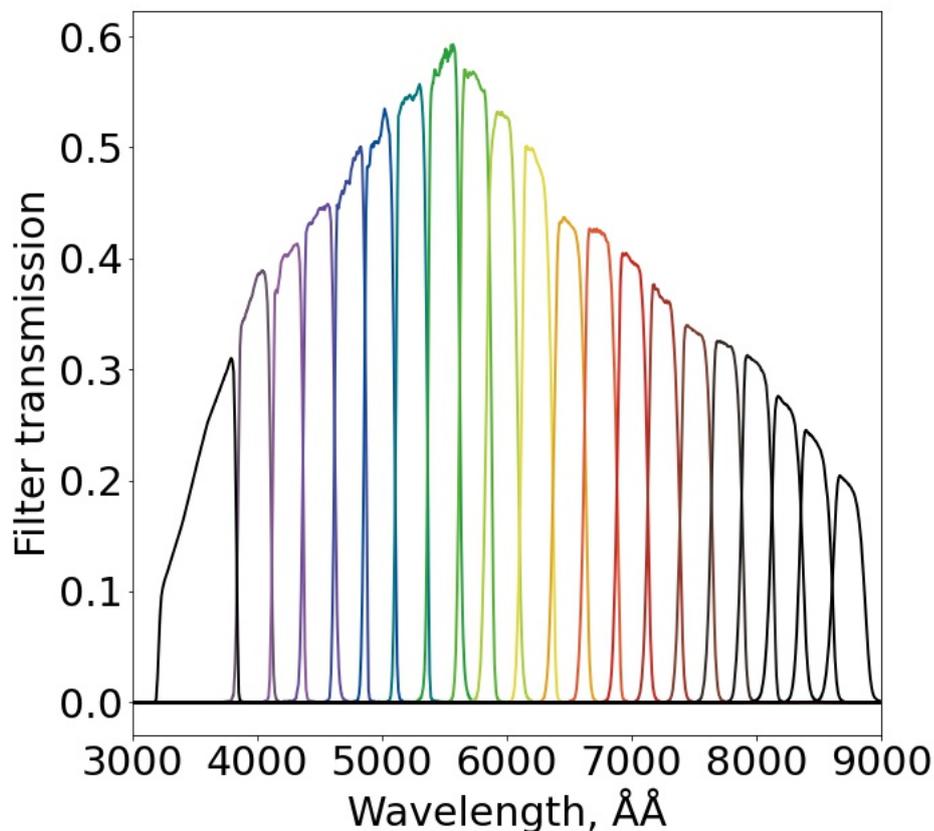


Рисунок 1.3 — Набор фильтров 1-м телескопа Шмидта БАО НАН РА, которые используются для построения спектральных распределений энергии (SED) объектов. Пропускание фильтров измерено в сходящемся пучке с светосилой $F/2$. Спектральная чувствительность CCD-детектора учтена.

телескопа [78]. Наблюдения проходили 25-ого и 28-ого февраля (сиинг равен 2.1" и 3.0" соответственно) и 13-ого и 14-ого декабря 2020 г. (1.5" и 1.3" соответственно). Ширина щели составляла 2". Время экспозиции для всех объектов приведено в таблице 2. В наблюдениях была использована призма VPHG940 @ 600, которая охватывает спектральный диапазон 3500-8500 ÅÅ и имеет дисперсию 1.16 Å px^{-1} . Спектральное разрешение составляет 7.0 Å , $R \sim 5200$ (FWHM для 1" щели). Общее время экспозиции было выбрано так, чтобы получить отношение сигнал/шум $\sim 5 - 10$.

Спектры всех объектов, попавших в щель и имеющих достаточное отношение сигнал/шум были обработаны. Были получены спектры 29 галактик, список которых представлен в Таблице 2. Для обработки спектров использовался стандартный пакет программ для спектральных наблюдательных данных, полу-

ченных на многомодовом фокальном редукторе SCORPIO-2. Этапы обработки данных включали: удаление следов космических частиц, вычитание тока смещения матрицы (bias), учет плоского поля (flat), калибровку по длинам волн, вычитание линий неба, учёт атмосферной экстинкции и спектральной чувствительности спектрографа по спектрофотометрическим стандартам, извлечение одномерного спектра, а также определение красного смещения объекта. Точность оценки спектрального красного смещения для всех галактик составляет 0.002.

Таблица 2 — Список объектов, для которых были проведены наблюдения на телескопе БТА с редуктором светосилы SCORPIO-2

#	RA (deg)	DEC (deg)	z	Экспозиция (сек.)
1	146.7229	48.3692	0.428	5401
2	146.717	48.3476	0.374	5401
3	146.7147	48.3379	0.207	5401
4	146.7135	48.3330	0.370	5401
5	148.4695	46.9942	0.058	3600
6	148.4375	46.9776	0.057	3600
7	148.4066	46.9626	0.438	3600
8	148.4313	47.0560	0.057	2700
9	148.3215	47.5878	0.107	2700
10	148.3057	47.5994	0.138	2700
11	148.3038	47.6004	0.139	2700
12	148.3013	47.6027	0.139	2700
13	146.8089	47.3558	0.307	3600
14	146.8386	47.3464	0.511	3600
15	147.8901	48.2253	0.369	3600
16	147.8830	48.2192	0.369	3600
17	147.8467	48.2400	0.132	3600
18	147.8441	48.241	0.485	3600
19	146.9614	47.1881	0.63	9000
20	146.9645	47.1722	0.542	9000
21	146.9651	47.1681	0.675	9000
22	148.2601	47.8147	0.208	2700
23	148.2076	47.8403	0.206	2700

Продолжение таблицы 2

#	RA (deg)	DEC (deg)	z	Экспозиция (сек.)
24	148.2622	47.8128	0.209	2700
25	148.1919	47.8485	0.177	2700
26	148.3428	47.8341	0.208	3600
27	148.3405	47.8381	0.196	3600
28	148.3249	47.8623	0.236	3600
29	148.32	47.869	0.226	3600

1.4 Анализ наблюдательных данных

В этом Разделе приведено краткое описание получения фотометрии объектов, определения фотометрических красных смещений и создания выборки галактик.

1.4.1 Фотометрия

Процедура обработки результатов фотометрических наблюдений разделяется на несколько последовательных шагов: предварительная редукция данных, оценка качества полученных данных и отбор пригодных для дальнейшей работы, совмещение и сложение снимков полученных в каждом фильтре, совмещение и приведение к единой системе координат снимков полученных в разных фильтрах, оценка качества полученного набора снимков и оценка шумовых характеристик изображений полученных в разных фильтрах, создание из снимков хорошего качества опорного изображения для детектирования объектов, фотометрия объектов с использованием SEXTRACTOR [79], классификация объектов и определение фотометрических красных смещений.

В этом разделе мы рассмотрим ключевые моменты редукции наблюдательных данных, опуская описание стандартных и хорошо описанных в литературе

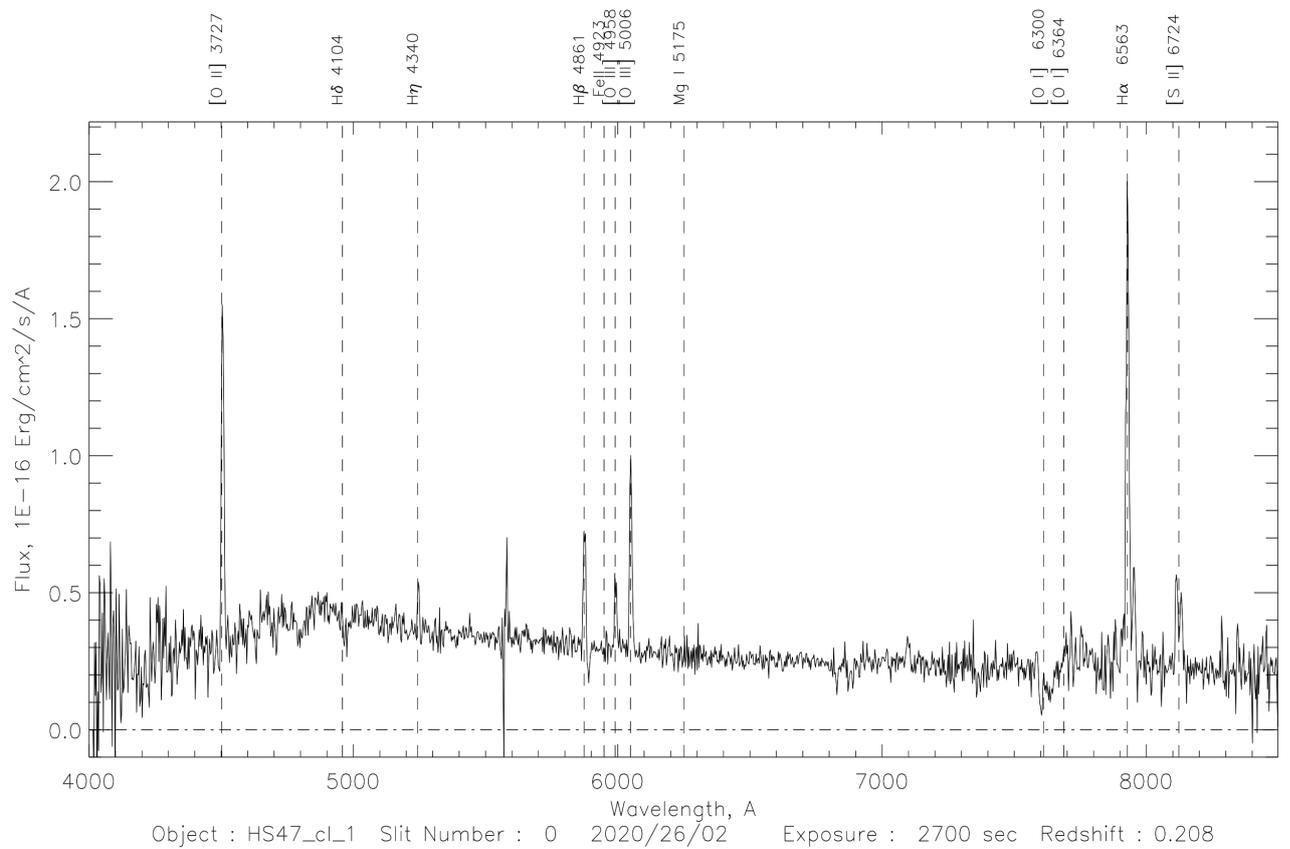
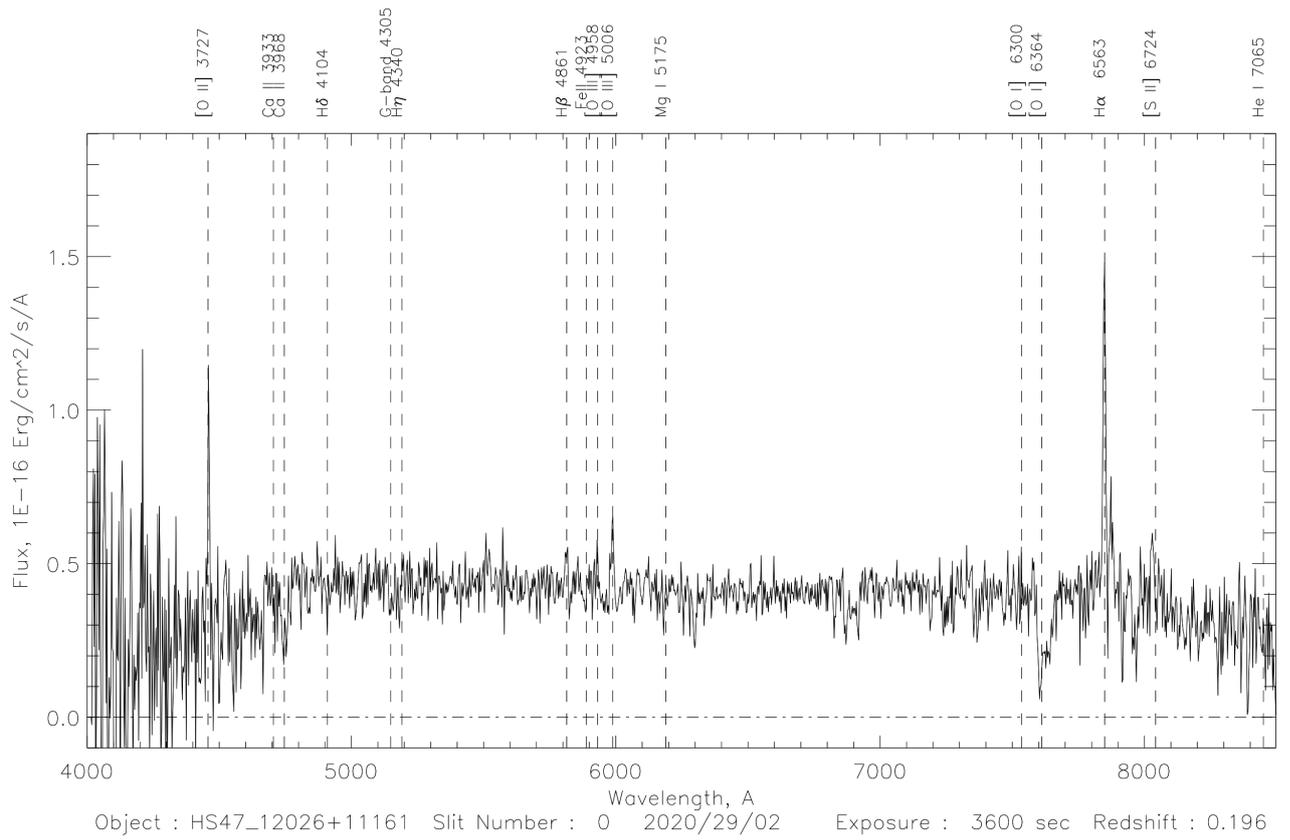


Рисунок 1.4 — Примеры спектров галактик, полученных на БТА с многорежимным редуктором первичного фокуса SCORPIO-2

[68; 80—82] шагов редукции данных таких как подготовка и вычитание среднего уровня “электронного поля”, подготовка вычитание среднего уровня темнового тока, коррекция за плоское поле, учет вклада фринговой составляющей в красных диапазонах, чистка космических частиц, оценка качества изображений и т.д.. После предварительной редукции данных все снимки для данного фильтра приводятся к единой системе координат, делаются оценки качества изображений, снимки с плохим качеством изображений отбрасываются после чего производится сложение снимков с приведением к экспозиции 1 секунда. Суммарные снимки поля в разных фильтрах приводятся к единой системе координат, а по данным USNO-B [83] создается астрометрическая структура, с помощью которой можно пересчитать положение объектов в поле зрения телескопа в RA и DEC, точность астрометрии, достигаемая для объектов исследуемого поля не хуже 0.2 arcsec (0.1-0.2 канала).

Возможны несколько стратегий использования SEXTRACTOR для детектирования и фотометрии объектов. Встроенная в программу возможность детектирования объектов на одном изображении и фотометрии на другом наиболее подходящая схема для фотометрии объектов на снимках, сделанных во многих фильтрах. Важным моментом в этом случае является создание базового изображения такого что бы не потерять объекты с необычными цветовыми характеристиками или объекты с отношением сигнал/шум близким к пределу обнаружения.

Здесь применяются разнообразные подходы создания базового изображения для детектирования объектов:

- наиболее глубокий снимок в красном (чтобы не потерять слабые галактики) диапазоне спектра [67];
- сумму двух или более снимков (как это было сделано для поля Hubble Deep Field (HDF) в работе [84]);
- сумму снимков с наилучшим качеством изображений с весовыми коэффициентами, рассчитанными исходя из шумовых характеристик снимков [85];
- χ^2 -изображения, предложенные для оптимального детектирования слабых объектов на снимках HDF [86].

Мы использовали вариант суммы снимков с весовыми коэффициентами, так как в этом случае мы можем использовать базовый снимок не только для де-

тектирования объектов, но и для измерения их морфологических параметров. Весовые коэффициенты рассчитывались по методике, предложенной в работе [85]. Детектирование объектов производилось в SEXTRACTOR после фильтрации с гауссовским ядром, соответствующим качеству изображений на базовом снимке. Уровень детектирования и анализа определялся так чтобы число “случайных” объектов на “негативном” базовом снимке не превышало 1% - 2% от числа обнаруживаемых на базовом снимке объектов, здесь мы использовали тот факт, что разброс шумовых отсчетов фона неба симметричен и позволяет сделать грубую оценку числа ложных объектов обнаруживаемых SEXTRACTOR.

Точные распределение энергии в спектре объектов (SED) могут построены только если в каждом фильтре проинтегрированы одни и те же части наблюдаемых объектов. Если не принимать во внимание изменения размера объектов (PSF) от снимка к снимку, то в одинаковых апертурах на разных снимках будут проинтегрированы разные части объектов. Это может привести к ошибкам в цветах объектов до 20% [82]. Общепринятая техника построения SEDs объектов состоит в приведении всех снимков к единому качеству изображений, наихудшему среди набора снимков [80; 87; 88]. Затем апертуры используются для интегрирования изображений объектов во всех фильтрах.

Шумовые характеристики отдельных изображений хорошо описываются дисперсией сигнала, накопленного в каждом канале поскольку пуассоновский шум сигнала и шум считывания детектора не коррелированы. Однако, обработка изображений: сдвиги, сложения и другие процедуры вносят корреляцию между соседними каналами, малые ошибки при вычитании фона ночного неба также могут влиять на шумы. Понимание свойств шумов необходимо поскольку именно они определяют глубину снимков и ошибки при фотометрии объектов. Прямые измерения зависимости дисперсии отсчетов (rms) от среднего значения фона неба и линейного размера $N = \sqrt{A}$, где A - площадь апертуры интегрирования дают более реалистичную оценку шумовых характеристик, чем формальная гауссовская оценка шумов $\sigma(N) = N < \sigma >$. В SEXTRACTOR оценка ошибок фотометрии делается именно на основе гауссовой оценки шумов, что приводит к существенному занижению ошибок фотометрии. Для оценки реальных шумовых характеристик на изображениях готовых к фотометрии в каждом фильтре мы проводим измерения потоков в более 1000 непересекающихся круговых апертурах случайно расположенных в областях свободных от

объектов. Размеры апертур меняются от 0.5 до 10 arcsec. Дисперсия сигнала оценивается по гистограммам распределения числа отсчетов для каждого размера апертуры. Дисперсия отсчетов зависит от размера апертуры и растет с увеличением апертуры. По завершению фотометрии объектов полученные таким образом оценки шумов добавляются в квадратурах к ошибкам фотометрии полученным в SEXTRACTOR с учетом геометрических размеров объекта.

Ключевой вопрос фотометрических наблюдений - калибровка каждого диапазона. При фотометрических условиях это может быть сделано с помощью наблюдений звезд спектрофотометрических стандартов. Это относительно просто для узких полос т.к. цветовые коэффициенты близки к 0. Важно иметь хорошую калибровку, т.к. ошибки в отдельных диапазонах могут имитировать спектральные детали. При наблюдениях в не фотометрических условиях возникает проблема возможных вариаций 0-пунктов фильтров. Наилучшее решение в этом случае иметь спектрофотометрические стандарты в одном поле с исследуемыми объектами. В этом случае вариации 0-пунктов устраняются так как одинаковое поглощение относится и к стандарту, и к исследуемому объекту. Для калибровки фотометрических данных был выбран второй вариант. Фотометрическая калибровка данных произведена с использованием спектроскопических и фотометрических данных из обзора SDSS для объектов в поле HS 47.5-22.

Полная выборка объектов поля (более 80,000 объектов до $m_{AB} \sim 25^m$) создана на базе суммы изображений, полученных в широкополосных фильтрах g , r , i SDSS. Используя суммарное изображение, были определены основные параметры объектов и в режиме двойных изображений с помощью SEXTRACTOR [79] проведена фотометрия объектов поля во всех доступных фильтрах. Фотометрия выполнена в двух режимах: с постоянной апертурой (3 arcsec) и AUTO-апертурой, которая использует в качестве апертур эллипс Крона [89] адаптированный к световому профилю каждого объекта. Первый режим позволяет оценить потоки от звездообразных объектов, второй - потоки от протяженных объектов.

Для оценки физических параметров галактик мы использовали кроновские потоки для 96% от общего числа отобранных объектов с помощью фотометрии MAG_AUTO SEXTRACTOR. Разница между количеством объектов, полученных двумя методами, объясняется тем, что на фотометрию с кроновскими апертурами могут иметь сильное влияние соседние объекты. Поэтому

галактики, чья фотометрия была сильно искажена соседями, были исключены из дальнейшего анализа физических свойств.

1.4.2 Фотометрические красные смещения

Методика определения фотометрических красных смещений с применением шаблонных распределений энергии достаточно проста и понятна: фотометрические данные сравниваются с синтетической фотометрией полученной из шаблонных распределений энергии (SED) в широком диапазоне красных смещений и наиболее вероятное значение красного смещения определяется из статистического анализа разницы между наблюдаемыми и модельными данными. В настоящее время существуют и доступны для использования несколько вариантов программ использующих различную технику синтетической фотометрии и интерпретации результатов сравнения наблюдаемых и модельных данных. Фотометрические измерения в 17 фильтрах позволяют нам построить распределения энергии в спектрах объектов с низким спектральным разрешением, для примера спектральные распределения энергии для 4 галактик из поля HS47.5 - 22 в 16 среднеполосных фильтрах и их SDSS-спектры показаны на Рисунке 1.5.

Для анализа данных мы использовали набор шаблонов спектров галактик из работы [90] и набор программ ZEBRA (Zurich's Extragalactic Bayesian Redshift Analyzer, [91]). Точность определения фотометрического красного смещения составляет $\sigma_{\text{NMAD}} < 0.004$, а доля ошибочных определений - $(\Delta z / (1 + z) > 5 \cdot \sigma_{\text{NMAD}}) \sim 7.7\%$ во всём диапазоне красных смещений. На Рисунке 1.5 приведено сравнение фотометрических красных смещений галактик, полученных с помощью программного обеспечения ZEBRA, и спектроскопических красных смещений из базы данных SDSS. Общее количество галактик со спектрально-измеренными красными смещениями в наблюдаемом поле HS47.5-22 составляет 414. Точность определения фотометрического красного смещения σ_{NMAD} изменяется от 0.002 для объектов ярче $r_{\text{SDSS}} = 19.0^m$ до 0.007 для объектов $r_{\text{SDSS}} = 22.5^m$.

1.4.3 Выборка галактик

Выборка галактик поля построена на основе полного фотометрического каталога ($\sim 85,000$ объектов) в соответствии со следующими критериями:

- Исключены объекты с собственным движением по данным из обзора GAIA DR2 [92; 93];
- Исключены звезды без собственных движений в обзоре GAIA по данным индекса автоматической морфологической классификации из обзора DECALS [94], отобраны объекты со значением морфологического индекса не равные 0 и 1, которые соответствуют звездобразным объектам;
- Исключены объекты с апертурной фотометрией, имеющие значительный вклад в измеренный в апертуре поток от соседних источников или большим количеством плохих пикселей, отобраны объекты со значением индекса переналожения $FLAGS \leq 2$ программы SEXTRACTOR;
- Исключены объекты слабее $R_{AB} = 22.5^m$, получена ограниченная по потоку выборка;
- Для изучения крупномасштабного распределения галактик выборка ограничена красным смещением $z = 0.8$, поскольку большинство протяженных объектов с красным смещением $z \geq 0.8$ слабее $R_{AB} = 22.5^m$ практически не обнаруживаются.

Из исходной выборки, состоящей из более чем 85,000 объектов, мы получили каталог галактик, объекты которого полностью удовлетворяют заданным условиям: ограничению по звездной величине $R_{AB} \leq 22.5^m$, красному смещению $z \leq 0.8$ и индексу переналожения $FLAGS \leq 2$. Окончательная выборка содержит 19,125 галактик с фотометрией в кроновских апертурах. Для кроновской фотометрии мы получаем только 19,029 объектов, это связано с наличием больших фотометрических ошибок для некоторых объектов. В программе SEXTRACTOR процедура MAG_AUTO обеспечивает полный поток источника в пределах эллиптической апертуры, определяемой функцией CROWN_RADIUS, а процедура MAG_PER для меньшей фиксированной апертуры (3 arcsec).

Объекты в полученном каталоге обладают широким диапазоном типов галактик, цветов и локальной плотности окружения, что показано на рисунке 1.5 и в главе 3. На рисунке 1.5 представлены спектральные распределения для 4 избранных галактик. На верхних панелях показаны галактики ранних типов, хорошо видно, что SED обнаруживает спектральные особенности галактик ранних типов, такие как линии поглощения (например, H + K CaII и Mg). Голубые и звездообразующие галактики с рекомбинационными линиями H_{α} и другими линиями, например, [OIII] λ 5007 и [OII] λ 3727, также очень хорошо выделяются в обзоре (см. нижнюю панель на рисунке 1.5). Галактики в группах, а также галактики в менее плотных средах хорошо идентифицируются, благодаря использованию фиксированной апертуры в 3" для фотометрии объектов. Это позволяет анализировать зависимость физических свойств галактик от плотности локального окружения в главе 3.

Полнота выборки галактик в фильтрах SDSS g, r и i была проверена путем сравнения с ранее опубликованными данными в работах [95–97]. Результаты показаны на рис. 4. Выборка галактик полна до $R_{AB} = 23.0^m$ без каких-либо цветовых эффектов во всем оптическом диапазоне.

1.4.4 Наблюдательные свойства выборки

На рисунке 1.7 сравниваются распределения красного смещения, звездной величины и ошибки в фильтре r SDSS полной выборки галактик gMOSS и финальной выбранной выборки галактик до $z = 0.8$. Как видно из верхней правой панели рисунка 1.7, ограничение выборки по красному смещению исключает большинство галактик со значительными ошибками в определении звездной величины в фильтре r SDSS, а также некоторые слабые объекты в выборке. После красного смещения $z = 0.3$ наблюдается резкий рост числа объектов, связанный с быстрым увеличением наблюдаемого объема. После красного смещения $z = 0.6$ происходит уменьшение количества объектов из-за выбранного ограничения по звездной величине. Большинство галактик в выборке имеют фотометрическое красное смещение от $z = 0.2$ до $z = 0.6$.

Мы можем определить физические параметры с помощью кода аппроксимации спектральных распределений энергии SIGALE для $\sim 95\%$ галактик из полученного каталога с приемлемым значением параметра $\chi^2 \leq 5$. Нефитируемые спектры не соответствуют требованиям, которое предъявляется кодом SIGALE, таким как минимальное отношение сигнал/шум в каждой полосе. Несмотря на то, что общее время экспозиции так, чтобы получить отношение сигнал / шум $\sim 5 - 10$ для объектов ярче, чем $r \text{ SDSS} \leq 22.5^m$, для некоторых слабых объектов этого времени может быть недостаточно для достижения требуемого отношения сигнал/шум.

1.5 Описание полученного каталога галактик

Описание каталога галактик, составленного из наблюдательных данных, полученных на 1-метровом телескопе Шмидта БАО НАН, представлено в таблице 3. Столбцы таблицы содержат следующую информацию о каталоге: (1) - имя параметра, (2) - единица измерения параметра (3) - описание параметра. Звездные величины даны в системе звездных величин AB и не исправлены за галактическое поглощение. Каталог включает точные фотометрические красные смещения ($\sigma_{\text{NMAD}} < 0.0044$ для всех типов галактик во всем диапазоне звездных величин), звездные величины в 16 среднелосных и фильтре u системы SDSS и их ошибки для каждого объекта. Каталог содержат галактики ярче 22.5^m в фильтре $r \text{ SDSS}$. Общее количество галактик в каталоге галактик составляет 19,029 во всем диапазоне красных смещений (до красного смещения $z = 0.8$ каталог содержит 17,067 галактик).

Таблица 3 — Описание колонок таблицы каталога галактик

Наименование	Ед. изм.	Описание
GalID	-	Уникальный идентификатор объекта
RA	degree	R.A., J2000
DEC	degree	DEC., J2000
zph	-	Фотометрическое красное смещение
zph_err	-	Ошибка фотометрического красного смещения
zsp	-	Спектральное красное смещение

Продолжение таблицы 3

Наименование	Ед. изм.	Описание
mu	mag	Звездная величина в фильтре <i>u</i> SDSS
eru	mag	Ошибка звездной величины в фильтре <i>u</i> SDSS
m400	mag	Звездная величина в фильтре mb400
er400	mag	Ошибка звездной величины в фильтре mb400
m425	mag	Звездная величина в фильтре mb425
er425	mag	Ошибка звездной величины в фильтре mb425
m450	mag	Звездная величина в фильтре mb450
er450	mag	Ошибка звездной величины в фильтре mb450
m475	mag	Звездная величина в фильтре mb475
er475	mag	Ошибка звездной величины в фильтре mb475
m500	mag	Звездная величина в фильтре mb500
er500	mag	Ошибка звездной величины в фильтре mb500
m525	mag	Звездная величина в фильтре mb525
er525	mag	Ошибка звездной величины в фильтре mb525
m550	mag	Звездная величина в фильтре mb550
er550	mag	Ошибка звездной величины в фильтре mb550
m575	mag	Звездная величина в фильтре mb575
er575	mag	Ошибка звездной величины в фильтре mb575
m600	mag	Звездная величина в фильтре mb600
er600	mag	Ошибка звездной величины в фильтре mb600
m625	mag	Звездная величина в фильтре mb625
er625	mag	Ошибка звездной величины в фильтре mb625
m650	mag	Звездная величина в фильтре mb650
er650	mag	Ошибка звездной величины в фильтре mb650
m675	mag	Звездная величина в фильтре mb675
er675	mag	Ошибка звездной величины в фильтре mb675
m700	mag	Звездная величина в фильтре mb700
er700	mag	Ошибка звездной величины в фильтре mb700
m725	mag	Звездная величина в фильтре mb725
er725	mag	Ошибка звездной величины в фильтре mb725
m750	mag	Звездная величина в фильтре mb750
er750	mag	Ошибка звездной величины в фильтре mb750

Продолжение таблицы 3

Наименование	Ед. изм.	Описание
m775	mag	Звездная величина в фильтре mb775
er775	mag	Ошибка звездной величины в фильтре mb775

1.6 Выводы и результаты Главы 1

В данной приводятся основные принципы астрономических среднеполосных фотометрических наблюдений, обработки наблюдательных данных, а также принципы создания среднеполосного фотометрического каталога галактик. Даны описания развития идей среднеполосной фотометрии, приведено рассмотрение уже существующих обзоров различной глубины и площади. Описаны особенности проведения наблюдений поля NS 47.5-22 площадью $2.38 \square^\circ$ на 1-метровом телескопе Шмидта БАО НАН и дополнительных наблюдений избранных галактик поля на 6-метровом телескопе БТА с прибором SCORPIO-2. Поскольку наблюдения на 1-метровом телескопе Шмидта БАО НАН стали возможными после реконструкции телескопа сотрудниками лаборатории совместно с армянскими коллегами, кратко излагаются основные модификации оборудования.

Представлен анализ наблюдательных данных: методика получения среднеполосной фотометрии, включая используемое программное обеспечение и его особенности, и 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. Освещены критерии, примененные к полной выборке объектов поля, для получения фотометрического каталога галактик, ограниченного звездной величиной $R_{AB} \leq 22.5^m$. Показаны наблюдательные свойства полученной выборки галактик и 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.

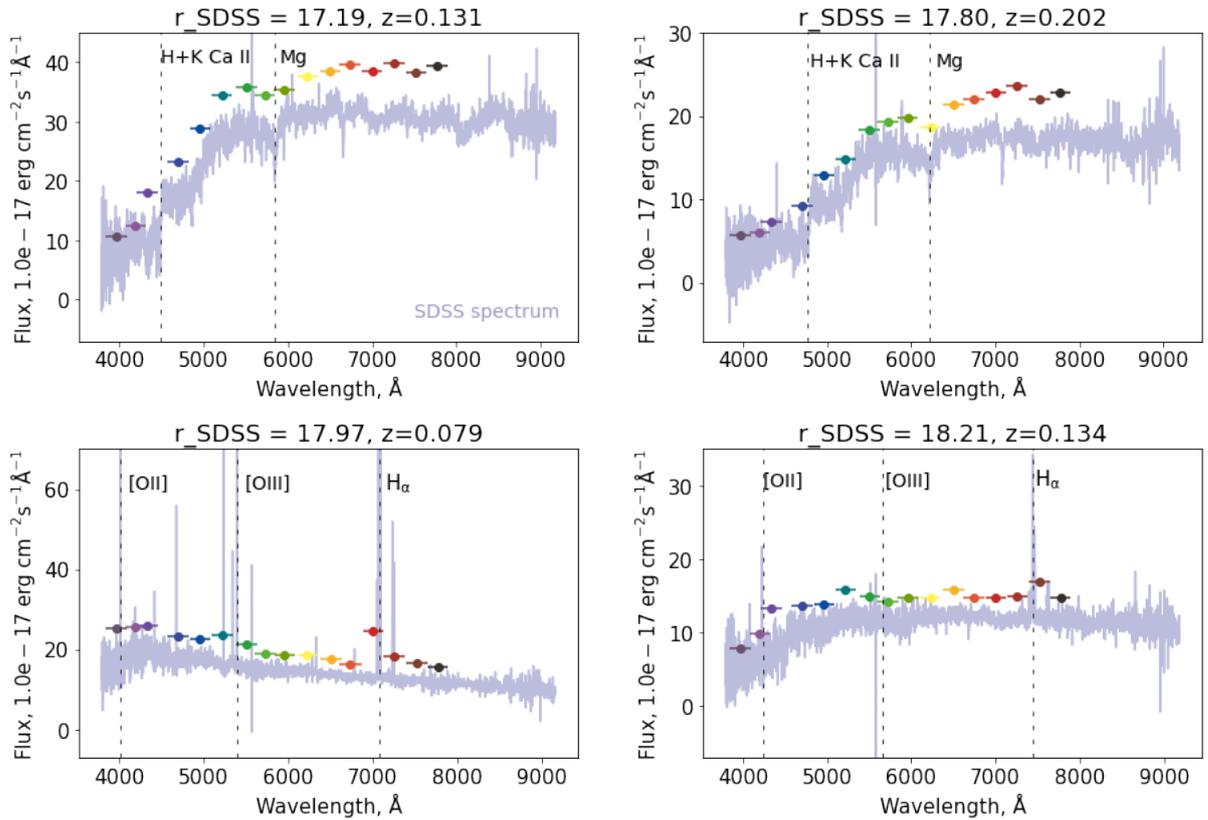


Рисунок 1.5 — Спектральные распределения энергии (SED) для четырех галактик поля HS 47.5-22. Горизонтальный бар показывает ширину полосы фильтра, а сплошная линия - спектры соответствующих объектов из обзора SDSS. Основные спектральные особенности (например, скачок H + K Ca II, линия поглощения Mg, эмиссионные линии H α , [O II] и [O III], обозначенные пунктирными линиями) хорошо видны на SED. Разница потоков в среднеполосных фильтрах и спектральных данных SDSS объясняется различием в размерах апертур интегрирования потоков: у спектров SDSS диаметр волокна спектрографа 3 arcsec, в исследуемых фотометрических данных апертура интегрирования определена радиусом Крона.

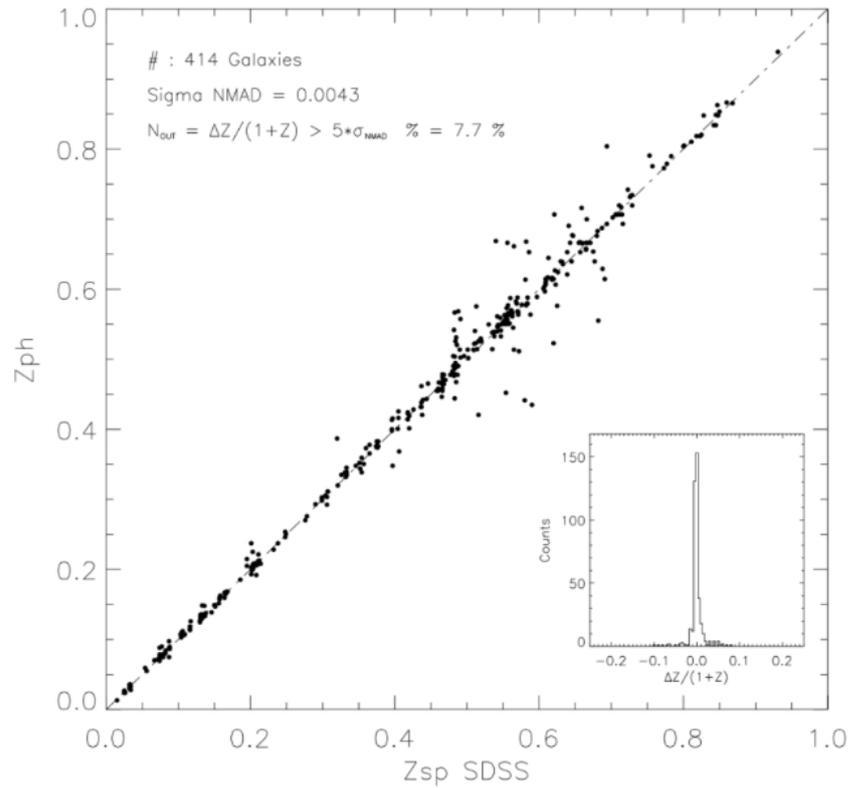


Рисунок 1.6 — Сравнение фотометрических красных смещений z_{ph} , полученных с помощью программного пакета ZEBRA, со спектроскопическими красными смещениями z_{sp} из обзора SDSS для 414 галактик поля HS 47.5-22.

Точность определения фотометрического красного смещения составляет

$$\sigma_{\text{NMAD}} < 0.004, \text{ процент отклоняющихся значений}$$

$\Delta z / (1 + z) > 5 \cdot \sigma_{\text{NMAD}} \sim 7.7\%$ во всём диапазоне красных смещений.

Пунктирная линия показывает линию равных фотометрических и спектральных красных смещений.

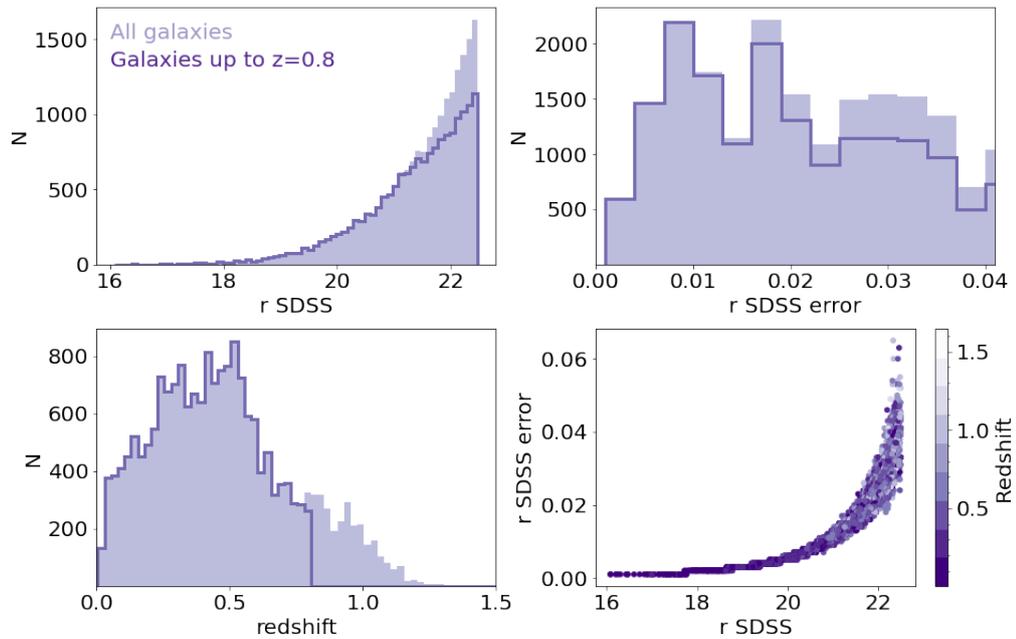


Рисунок 1.7 — Распределение наблюдательных свойств галактик поля HS 47.5-22. *Верхняя левая, верхняя правая и нижняя левая панели:* распределения звездной величины в фильтре r SDSS и их ошибок, а также красных смещений галактик с r SDSS $\leq 22.5^m$, для всех галактик выборки с r SDSS $\leq 22.5^m$ (светло-фиолетовая линия) и для галактик с фотометрическими красными смещениями $z \leq 0.8$ (темно-фиолетовая линия). Все звездные величины и связанные с ними ошибки были получены с помощью программы SEXTRACTOR. *Нижняя правая панель:* ошибки r SDSS в зависимости от звездной величины в фильтре r SDSS. Цветовой бар показывает красное смещение каждой галактики.

Глава 2. Эволюция свойств звездных популяций галактик выборки

В этой главе описывается распределение свойств звездных популяций галактик, полученных с помощью программного пакета SIGALE для фотометрических измерений объектов из каталога gMOSS. Для анализа физических свойств звездных популяций галактик мы использовали только объекты до $z \approx 0.8$, поскольку большинство протяженных объектов при $z \geq 0.8$ слабее 22.5^m едва обнаруживаются, поэтому у нас нет достаточного количества объектов для статистического анализа. Общее количество галактик для оценки свойств звездных популяций составляет 16,509.

2.1 Свойства звездных популяций в выборке галактик

Существует множество современных программных кодов для SED-подгонки спектров во всем диапазоне спектра от рентгена до радио: PROSPECT [98], BEAGLE [99], BAGPIPES [100], SIGALE [101–103], PROSPECTOR [104; 105], MAGPHYS [106], BAYSED [107–109] и др.

В нашей работе физические параметры галактик были получены с помощью программного пакета SIGALE [101–103] из фотометрических данных с кроуновскими апертурами из Главы 1. SIGALE (Code Investigating GALaxy Emission) - это программный пакет, написанный на языке программирования Python, который реализует метод аппроксимации спектральных распределений энергии галактик. Код был разработан для изучения эволюции галактик путем сравнения смоделированных распределений спектральной энергии галактик с наблюдаемыми распределениями в диапазоне электромагнитного спектра от дальнего ультрафиолетового до дальнего инфракрасного излучения.

С помощью аппроксимации шаблонов спектров можно получить ряд физических параметров звездного населения галактик (общая светимость, возраст основной звездной популяции в галактике, масса газа, масса звезд и скорость звездообразования).

Основные входные параметры для работы программного пакета SIGALE:

- Набор синтетических спектров галактик BC03 был взят из работы [110] с начальной функцией масс из работы Chabrier [111];
- Металличность для расчета моделей спектров принимала набор значений: 0.004, 0.008, 0.02, 0.05;
- Предполагается экспоненциально снижающаяся скорость звездообразования с 14 различными значениями шкалы времени звездообразования в диапазоне от 0.1 до 12 млрд. лет.;
- Кривая межзвездного поглощения взята из работы Calzetti и др. [112] с 11 различными значениями параметра величины поглощения A_V для молодых звезд (0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 mag) и пятью значениями понижающего коэффициента для $E(B-V)$ старой популяции по сравнению с молодой: 0.25, 0.44, 0.75, 0.95, 0.99.

2.1.1 Аппроксимация спектральных распределений энергии

Как было показано выше, фотометрические измерения в 16 среднеполосных фильтрах хорошо воспроизводят спектральные распределения энергии галактик разных типов (например, для ранних и поздних типов) независимо от величины красного смещения и яркости объекта (см. рисунок 1.5). Аппроксимация спектральных распределений достаточно хорошо воспроизводит значения в 16 среднеполосных и u SDSS фильтрах для различных типов галактик в выборке gMOSS в пределах ошибки, независимо от диапазона красного смещения и звездной величины. На рисунке 2.1 показаны близлежащие галактики (до $z = 0.1$) в диапазоне звездных величин от 18.0^m до 21.0^m в фильтре r SDSS. Основные спектральные особенности раннего (например, H+K Ca II, Mg) и позднего типа (например, H α , [OII] и [OIII]) галактик также хорошо воспроизводятся программным кодом. Невязки аппроксимации SED увеличиваются в сторону более слабых величин из-за более высоких неопределенностей в данных, которые также увеличиваются для более слабых объектов.

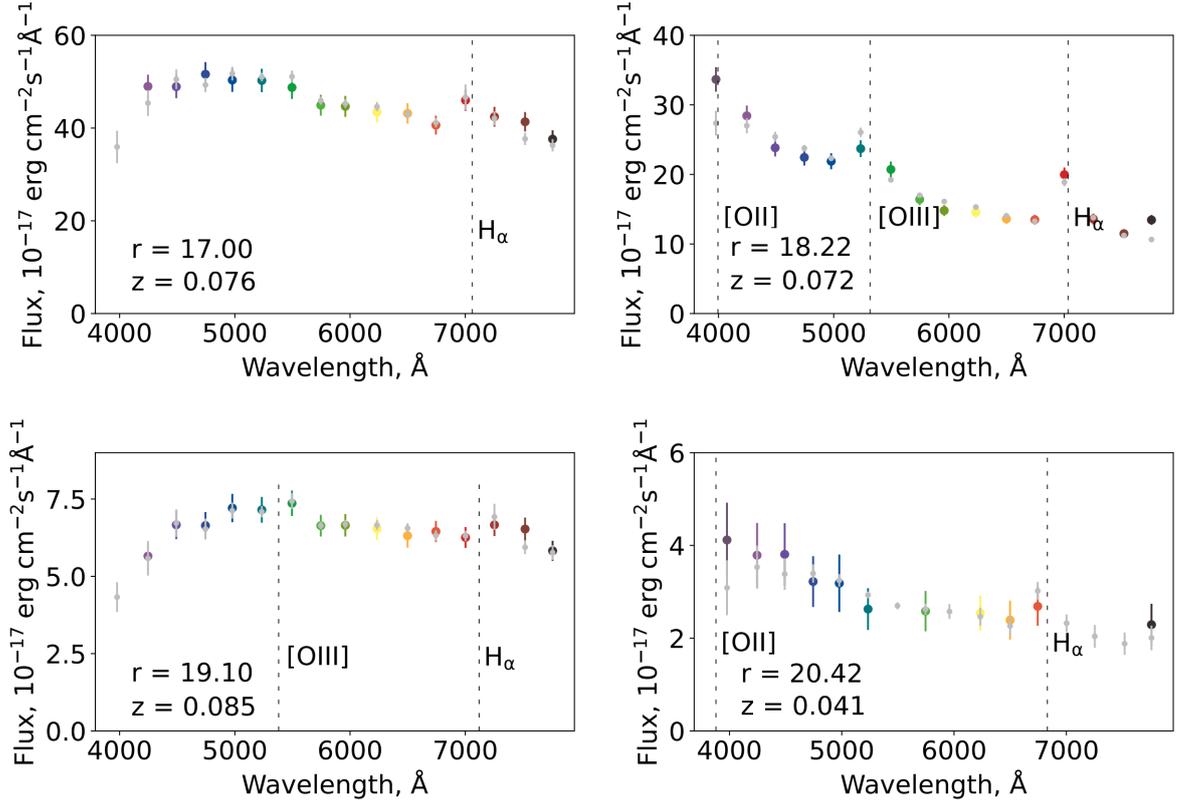


Рисунок 2.1 — Спектральные распределения энергии для разных галактик в диапазоне звездной величины $17.0^m \leq r\text{SDSS} \leq 20.42^m$ и красного смещения $z = 0.04 - 0.08$ показаны цветными точками. Цветные бары показывают отклонение $\pm 1\sigma$. Спектральные распределения энергии, полученные с помощью SIGALE, показаны серыми точками, а серые бары показывают значения неопределенности на уровне $\pm 1\sigma$.

2.1.2 Оценка качества аппроксимации

Спектральные распределения энергии, полученные в Главе 1, хорошо воспроизводятся программным пакетом SIGALE. Качество соответствия для всей выборки галактик можно оценить с помощью различных оценок или параметров, например, с помощью параметра уменьшенного значения χ^2 . Зависимость уменьшенного значения χ^2 от отношения сигнал/шум приведена на рисунке 2.2, цветовая полоса соответствует красному смещению для каждого объекта. Величина уменьшенного значения χ^2 увеличивается с уменьшением отношения сигнал/шум и увеличением величины красного смещения. Примерно половина

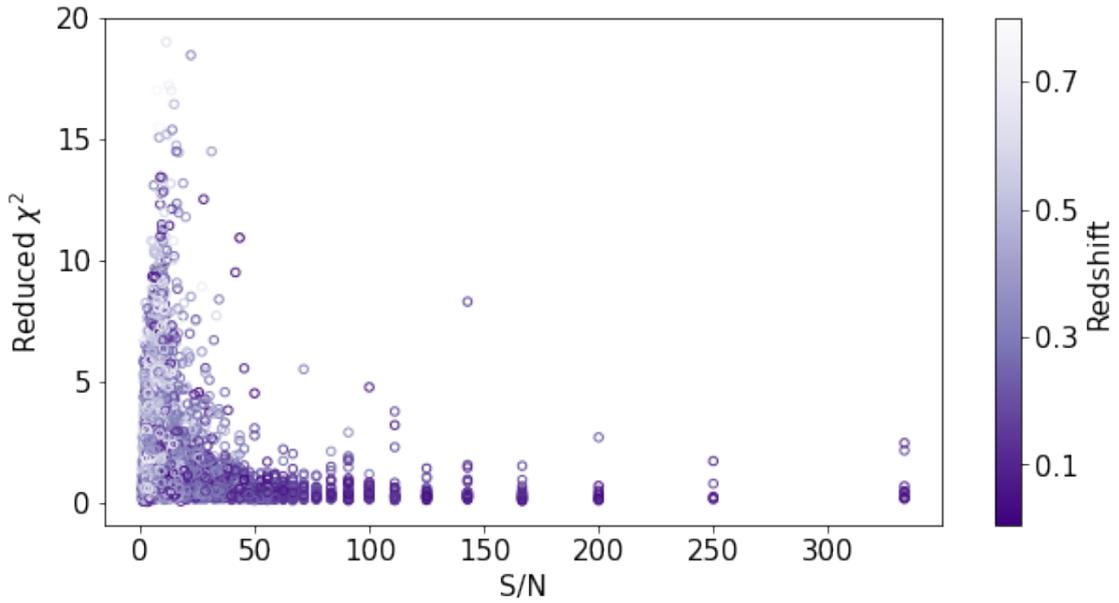


Рисунок 2.2 — Распределение параметра уменьшенного χ^2 от отношения сигнал/шум для каждого объекта, цветовая полоса соответствует красному смещению для каждого объекта.

объектов имеет $\chi^2_{\text{reduced}} \leq 0.5$, а для ~ 60 процентов объектов $\chi^2_{\text{reduced}} \leq 1.5$. Мы получили довольно небольшие значения для приведенного параметра χ^2 , что показывает хорошую точность оценки физических величин галактик в выборке.

Мы можем аппроксимировать 12,281 галактику из 16,509 объектов полной выборки ($\sim 74\%$) с помощью кода SIGALE. Этого количества объектов достаточно для изучения статистических зависимостей физических свойств галактик во всем изученном диапазоне красных смещений $z \leq 0.8$.

2.1.3 Распределение свойств звездных населений

На рис. 2.3 показаны распределения выбранных физических свойств аппроксимированных галактик. Фиолетовые градиентные линии показывают качество аппроксимации SED (уменьшенный χ^2 параметр). Цвет $(u - r)_{\text{res}}$ показывает бимодальное распределение галактик, где максимальная плотность находится в $(u - r)_{\text{res}} \sim 1.5^m$ для голубых галактик и $(u - r)_{\text{res}} \sim 2.5^m$ для красной последовательности. Бимодальное распределение становится более видимым с

уменьшением значения параметра χ^2_{reduced} . Взвешенное по массе распределение по возрасту $\langle \log \text{age} \rangle_M$ [yr] имеет два пика на ~ 9.0 и ~ 9.6 dex.

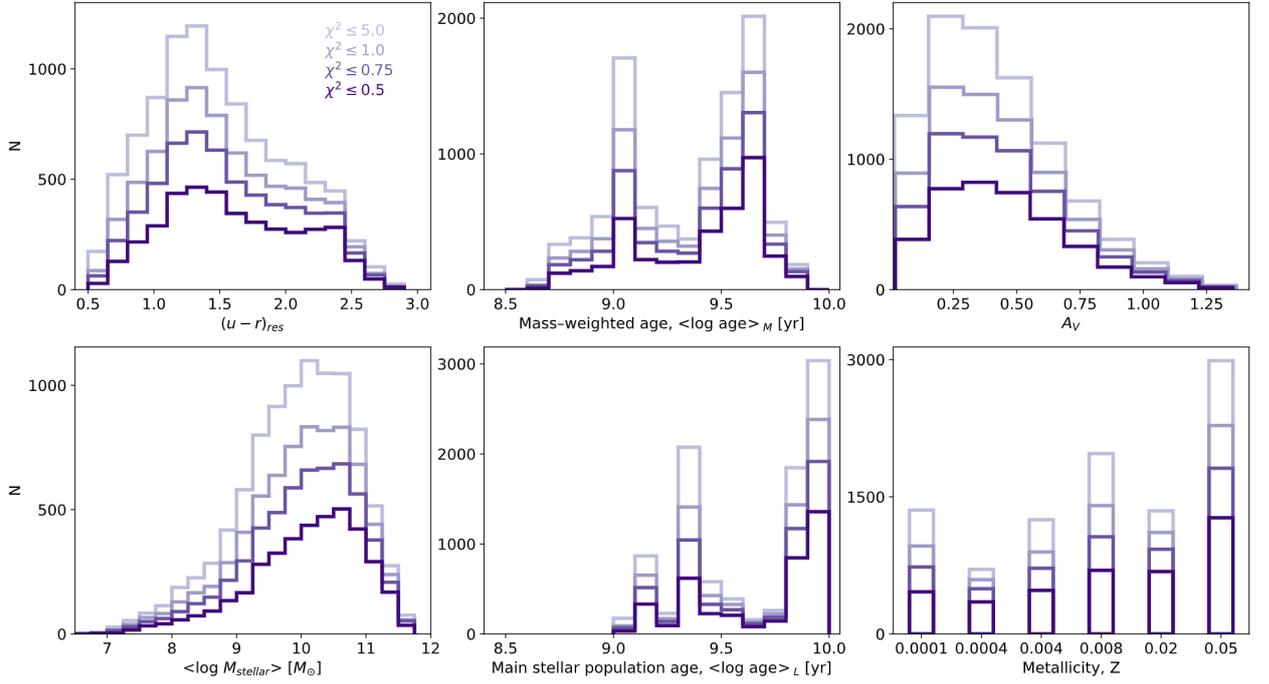


Рисунок 2.3 — Сравнение распределений свойств звездных популяций, полученных с помощью SIGALE, путем спектрального фитирования с использованием MAG_AUTO для массы звезд и газа в галактиках, показателя цвета $(u - r)_{res}$ в собственной системе координат, взвешенного по массе возраста, межзвездного поглощения A_V , общей звездной массы, возраста основного звездного населения в галактике и металличности.

Межзвездное поглощение A_V для выборки галактик распределено в диапазоне от 0 до 1.4 mag, что немного меньше диапазонов, полученных в других работах (например, в [72] величина поглощения находится в диапазоне от 0 до 2.0 mag). Это связано с выбором поля для наблюдений, которое находится в области с очень низкой плотностью нейтрального водорода на визуальном луче зрения $\langle N_H \rangle = 10^{20} \text{ cm}^{-2}$, что ненамного выше значения поглощения в области "Дыры Локмана" [77], где наблюдается наименьшее поглощение в визуальном луче для северного неба $\langle N_H \rangle = 4.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$.

Распределение звездной массы колеблется от ~ 7 до ~ 11.5 dex. Распределение возраста основной звездной популяции $\langle \log \text{age} \rangle$ [yr] имеет два пика на ~ 9.4 и ~ 9.9 dex. Металличность распределяется дискретно из-за вычислительных ограничений сервера, на котором происходил расчет моделей.

2.1.4 Диаграмма масса - показатель цвета

Для изучения различий между красной и синей популяциями галактик принято использовать диаграммы масса - показатель цвета [23; 24; 113]. Показатель цвета $(u - r)_{res}$ галактик показывает четкое бимодальное распределение двух популяций галактик. На рис. 2.4 показаны диаграммы массы-цвета в сочетании с параметрами взвешенного по массе возраста, металличности и экстинкции.

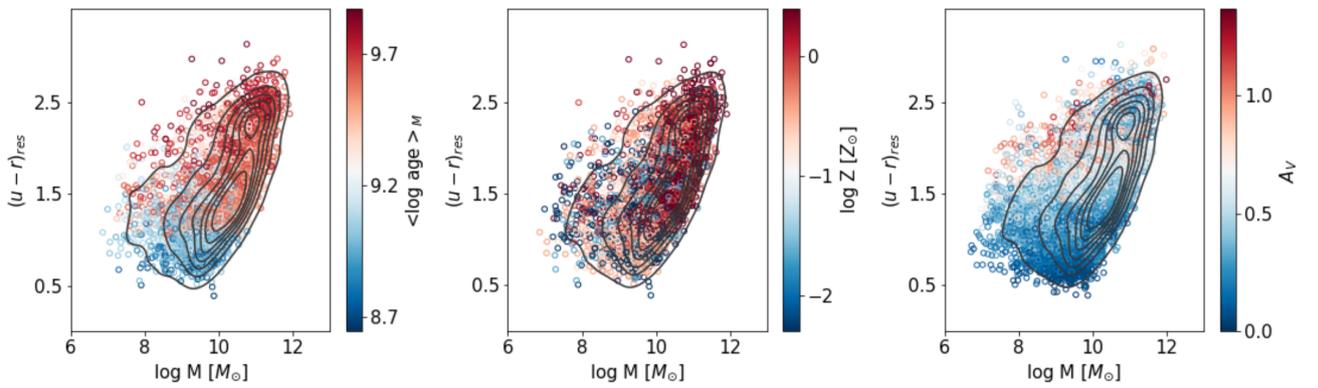


Рисунок 2.4 — Соотношение массы и цвета $(u - r)_{res}$, цветовой бар показывает свойства звездных популяций галактик (возраст, поглощение и металличность). Физические свойства галактик были получены с помощью фотометрии с кроуновскими апертурами. Контурами показана плотность вероятности для всех значений.

Диаграмма массы-цвета с параметром взвешенного по массе возраста (рис. 2.4, слева) показывает видимое разделение галактик на более молодые голубые галактики с $\log(\text{age})_M [\text{yr}]$ до ~ 9.4 dex и более старые красные с $\log(\text{age})_M [\text{yr}]$ выше ~ 9.5 dex. Большинство галактик имеют солнечную металличность, однако для галактик красной последовательности часто встречаются значения сверхсолнечной металличности, а для голубых галактик - значения низкой металличности. Величина межзвездного поглощения практически не зависит от того, для какой популяции галактик она определена. Однако $A_V > 1.0^m$ типично для галактик с $(u - r)_{res} \sim 1.5^m$, что примерно соответствует галактикам из зеленой долины. Это согласуется с предположением, что галактики зеленой долины являются звездообразующими галактиками из голубого облака [24; 72].

2.1.5 Оценка точности полученных свойств звездных популяций

Ошибки в определении физических свойств галактик были получены внутри кода SIGALE. На рисунке 2.5 показано распределение точности физических свойств галактик на диаграмме цвет - масса. Параметр возраста основного звездного населения галактики обладает наилучшей точностью оценки: $\sigma(\log(\text{age})_L) = 0.05 \pm 0.04$ dex. Оценки точности общей массы звезды, взвешенного по массе возраста и показателя цвета в системе покоя $(u-r)_{\text{res}}$ получены с хорошей точностью: $\sigma(\log(M)_{[M_\odot]}) = 0.12 \pm 0.05$ dex, $\sigma(\log(\text{age})_M) = 0.10 \pm 0.04$ dex and $\sigma(u-r)_{\text{res}} = 0.19 \pm 0.08$ mag. Точность определения межзвездного поглощения составляет $\sigma(A_V) = 0.28 \pm 0.09$ mag. Точность оценок зависит от отношения сигнал/шум и разрешения спектральных распределений энергии. Полученные оценки точности весьма схожи с оценками точности физических параметров из других работ, например, из работы [72] по обзору miniJPAS. Среднее значение S/N в исследуемой выборке составляет ~ 10 , при этом разрешение более чем в два раза хуже, чем в обзоре miniJPAS (ширина фильтров FWHM которого равна 100 \AA), поэтому точность наших оценок ниже, чем в упомянутом обзоре.

Диаграммы цвет - масса на рисунке 2.5 показывают, что величина ошибок в определении физических параметров галактик неодинакова для разных популяций галактик. Бимодальность распределения хорошо видна на диаграммах, показывающих погрешность в определении как взвешенного по массе возраста, так и возраста основной звездной популяции. Для галактик красной последовательности это значение редко превышает значения $\sigma(\log(\text{age})_M) \leq 0.1$ dex и $\sigma(\log(\text{age})_L) \leq 0.1$ dex соответственно. Кроме того, масса основного звездного населения также определяется лучше для красных галактик $\sigma(\log(M)_{[M_\odot]}) \leq 0.1$ dex, чем для галактик голубого облака $\sigma(u-r)_{\text{res}}$. Неопределенности в значении межзвездного поглощения A_V схожи для всех галактик голубого облака, в то время как более высокое значение $\sigma(A_V)$ соответствует наиболее массивным галактикам в красной последовательности.

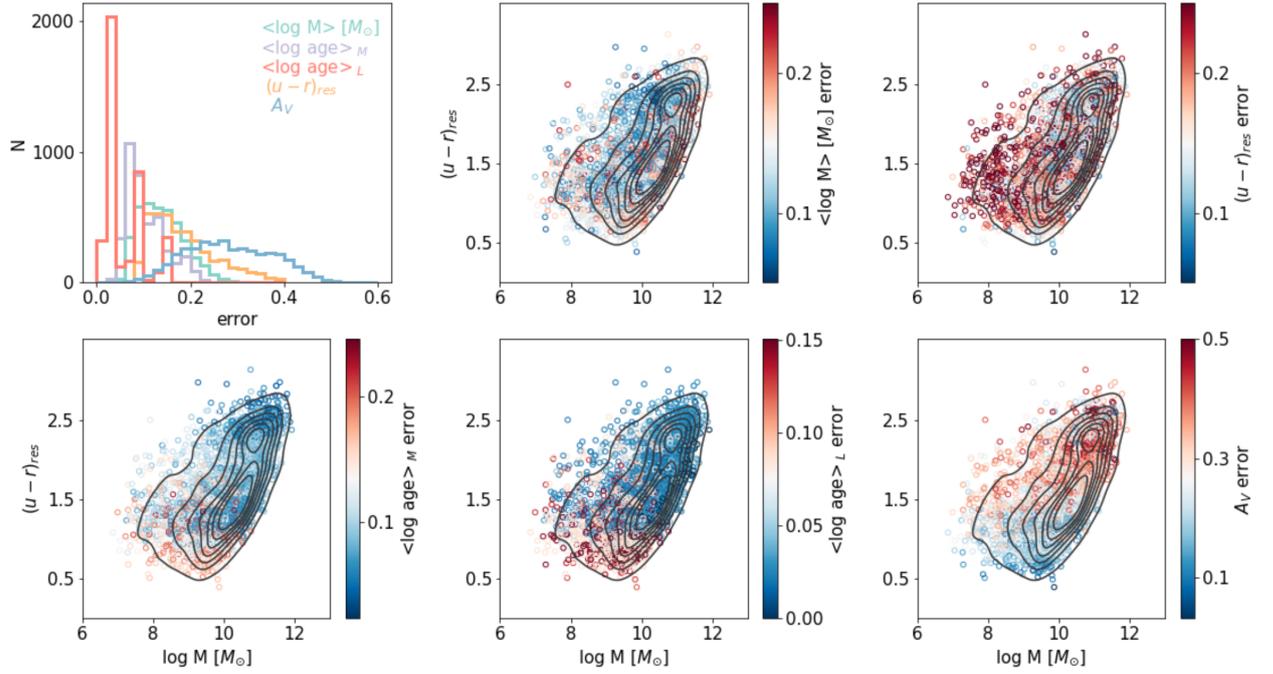


Рисунок 2.5 — Распределение стандартных отклонений в определении свойств галактик (*верхняя левая панель*) и диаграмма цвет - масса, с цветовым баром, который показывает стандартное отклонение свойств звездного населения: общей массы звезд, показатель цвета $(u - r)_{\text{res}}$ в системе покоя, взвешенный по массе возраст, возраст основной звездной популяции в галактике и поглощение в фильтре V A_V .

2.2 Эволюция популяций галактик

Точность оценки фотометрических красных смещений в исследуемой выборке галактик ($\sigma_{\text{NMAD}} < 0.0043$) позволяет изучать эволюцию физических свойств галактик со временем. На момент публикации обзор gMOSS покрывает наибольшую площадь (общая однородная площадь составляет $\sim 2.386 \square^\circ$) среди глубоких среднеполосных обзоров, что делает его данные достаточно однородными и полными. Достаточное разрешение SED (FWHM среднеполосных фильтров составляет 250 \AA) позволяет разделить галактики на красную последовательность и голубое облако, и изучать их свойства независимо друг от друга с течением времени.

В данной работе не было цели детального изучения эволюции и формирования галактик в зависимости от красного смещения. Мы исследовали физические свойства галактик в целом и сравнили полученные результаты с преды-

дущими работами других авторов. Для правильной интерпретации результатов необходимо учитывать, что существует ограничение на видимость галактик определенной абсолютной величины галактики при определенном красном смещении (Смещение Малмквиста, [114]). Таким образом, наименее массивные галактики выпадают из поля нашего рассмотрения с увеличением красного смещения. Мы оставляем изучение смещения в область более массивных галактик за пределами этой работы. Однако следует отметить, что на рисунке 2.6 показано, что галактики с массой менее $10^8 M_{\odot}$ встречаются только при низких красных смещениях.

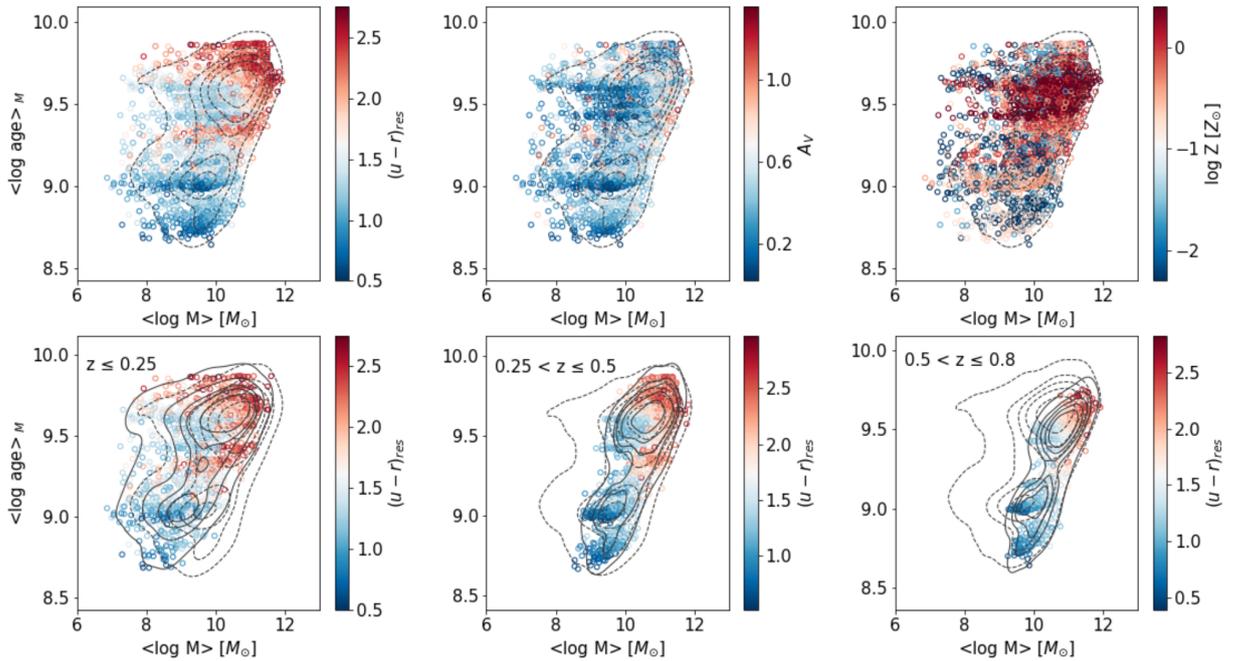


Рисунок 2.6 — *Верхняя панель*: Распределения показателя цвета в системе покоя $(u - r)_{\text{res}}$, межзвездного поглощения A_V и металличности в зависимости от массы и возраста. Значения всех параметров кодируются в соответствии с цветовыми барами. *Нижняя панель* иллюстрирует распределение показателя цвета в системе покоя $(u - r)_{\text{res}}$ на диаграмме масса - возраст для трех диапазонов красного смещения: $z \leq 0.25$, $0.25 < z \leq 0.5$ и $0.5 < z \leq 0.8$. Пунктирные контуры показывают распределение полной выборки галактик. Дискретизация значений возраста галактик происходит из-за ограничений вычислительной мощности сервера, используемого для проведения аппроксимации спектральных распределений энергии.

Для анализа физических свойств галактик мы планировали использовать фотометрию, полученную в кроновских апертурах. Однако в ходе исследования было обнаружено, что фотометрия в кроновских апертурах эффективна только для галактик до $R_{\text{AB}} = 20.5^m$, а для более слабых объектов из-за недостаточного соотношения сигнал/шум возрастают неопределенности, связанные с определением кроновского радиуса для отдельных объектов. Поэтому для объектов, более слабых, чем $R_{\text{AB}} = 20.5^m$, была использована апертурная фотометрия.

2.2.1 Эволюция популяций галактик на диаграмме Масса-возраст

Как и на диаграмме масса - показатель цвета, бимодальность в распределении галактик довольно четко видна на диаграмме масса - возраст $\log(M)_{[M_{\odot}]} - \log(\text{age})_{\text{M}}$ (рисунок 2.7). Самые старые галактики в выборке имеют более красные цвета, большую массу и наиболее высокое значение металличности.

В недавних работах [13; 21; 72] показано, что бимодальность распределения также наблюдается из-за того, что галактики голубого облака имеют линейную зависимость возраста от звездной массы. В нашей работе мы также обнаруживаем эту зависимость (рисунок 2.6, нижняя панель). Эта зависимость наиболее четко проявляется, если проанализировать галактики из одних и тех же космических эпох. Для этой цели полная выборка галактик была разделена на три диапазона: $z \leq 0.25$, $0.25 < z \leq 0.5$ and $0.5 < z \leq 0.8$. При малом красном смещении отношение массы к возрасту показывает изменение наклона зависимости для галактик с массой, превышающей $\log(M)_{[M_{\odot}]} = 10.5$ dex, для которых отношение $\log(M)_{[M_{\odot}]} - \log(\text{age})_{\text{M}}$ становится слегка наклонным по сравнению с галактиками позднего типа. Этот предел массы относится к галактикам зеленой долины, которые являются переходными от галактик голубого облака к красной последовательности. Анализируя красные галактики всех трех диапазонов красного смещения, заметно, что с уменьшением возраста масса галактики также уменьшается. Таким образом, мы можем предположить, что наименее массивные галактики образовались в более поздние космические эпохи.

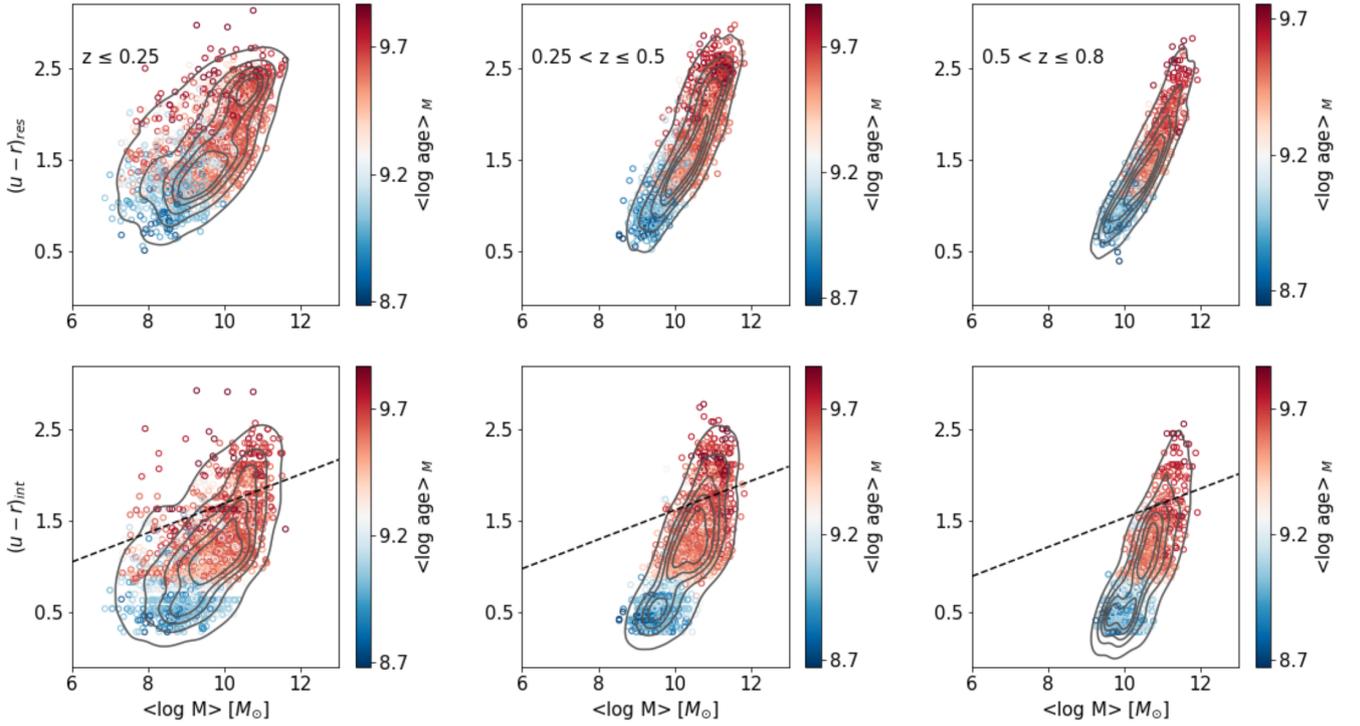


Рисунок 2.7 — Диаграмме масса - показатель цвета для показателя цвета системы покоя (*верхняя панель*) и истинного (*нижняя панель*) цвета $(u - r)$ в трех ячейках красного смещения: $z \leq 0.25$, $0.25 < z \leq 0.5$ и $0.5 < z \leq 0.8$ (*слева направо*). Пунктирная линия показывает предел истинного цвета для классификации галактик для среднего красного смещения в каждой ячейке.

2.2.2 Эволюция популяций галактик на диаграмме масса-возраст с учетом поправки на поглощение

Поглощение пыли окрашивает галактики в более красный цвет, поэтому важно изучить соотношение цвета и массы не только для цвета в системе покоя $(u - r)_{\text{res}}$, но и для цвета $(u - r)_{\text{int}}$ в системе покоя с поправкой за поглощение (истинный цвет). После коррекции на поглощение соотношение между галактиками красной последовательности и голубым облаком значительно меняется [23; 24].

На рисунке 2.7 показано распределение галактик на диаграмме масса - показатель цвета для $(u - r)_{\text{res}}$ в системе покоя и для истинного $(u - r)_{\text{int}}$ в трех диапазонах красного смещения: $z \leq 0.25$, $0.25 < z \leq 0.5$ и $0.5 < z \leq 0.8$. Видно, что распределение галактик на диаграмме масса - показатель цвета для $(u - r)_{\text{res}}$ в системе покоя и истинного $(u - r)_{\text{int}}$ значительно различаются в

каждом диапазоне красного смещения. С введением поправки на поглощение значительная часть галактик из зеленой долины переходит в голубое облако. Это связано с тем, что значительная часть галактик зеленой долины является запыленными звездообразующими галактиками (30–65 %, [24]), при этом их доля растет с ростом массы и красного смещения. Доля таких галактик в ближней Вселенной невелика, но и не пренебрежимо мала [23]. При высоких красных смещениях доля запыленных галактик зеленой долины растет.

2.2.3 Разбиение выборки галактик на красную и синюю популяции

Мы используем методику разделения галактик на красную последовательность и голубое облако, разработанную в работе [24] для галактик из обзора ALHAMBRA в диапазоне красного смещения от $0.1 \leq z \leq 1.1$. В обзоре ALHAMBRA использовался набор из 20 среднеполосных фильтров в оптическом диапазоне, а также фильтры ближнего инфракрасного диапазона J, H и K_s. Используя метод аппроксимации спектральных распределений энергии, авторы определили физические свойства галактик, такие как звездная масса, показатели цвета в системе покоя и межзвездное поглощение для каждой галактики. Это позволило им разделить галактики из обзора на популяции красной последовательности и голубого облака. Они определили долю пыльных звездообразующих галактик зеленой долины с помощью классических цветовых диаграмм и истинного показателя цвета. Авторы пришли к выводу, что использование диаграммы масса - показатель цвета может уменьшить "загрязнение" доли галактик из красной последовательности на 20 % по сравнению с использованием двуцветных диаграмм.

В работе [24] уравнение 3, определяющее предел разделения галактик на красную последовательность и голубое облако, использовало истинные цвета для фильтров m_{F365} и m_{F551} . В уравнении 5 работы [72] этот критерий был пересчитан в цвета $(u - r)_{\text{int}}$, аналогичные нашей фотометрической системе. Таким образом, мы можем использовать это уравнение 2.2 без каких-либо исправлений.

$$(u - r)_{\text{res}}^{\text{lim}} = 0.16 \cdot (\log M - 10.0) - 0.3 \cdot (z - 0.1) + 1.7, \quad (2.1)$$

где z - фотометрическое красное смещение каждой галактики, а $\log M$ - ее звездная масса.

Галактики из обзора gMOSS помечаются как потухшие, если их истинный цвет краснее предельного значения $(u - r)_{\text{res}}^{\text{lim}}$ в противном случае галактики являются звездообразующими.

2.2.4 Описание свойств галактик красной и синей популяций

Используя критерий отбора звездообразующих и спокойных галактик из уравнения 2.2, мы получили, что около $\sim 86\%$ выборки из исследуемого обзора составляют галактики голубого облака, а на долю галактик красной последовательности приходится оставшиеся $\sim 14\%$.

На рисунке 2.8 показаны распределения физических свойств для двух отдельных популяций галактик для показателя цвета $(u - r)_{\text{res}}$ в системе, общей звездной массы, поглощения A_V . Обычно красные галактики имеют более красный цвет $(u - r)_{\text{int}}$ и меньшее поглощение. Кроме того, галактики из красной последовательности более массивны.

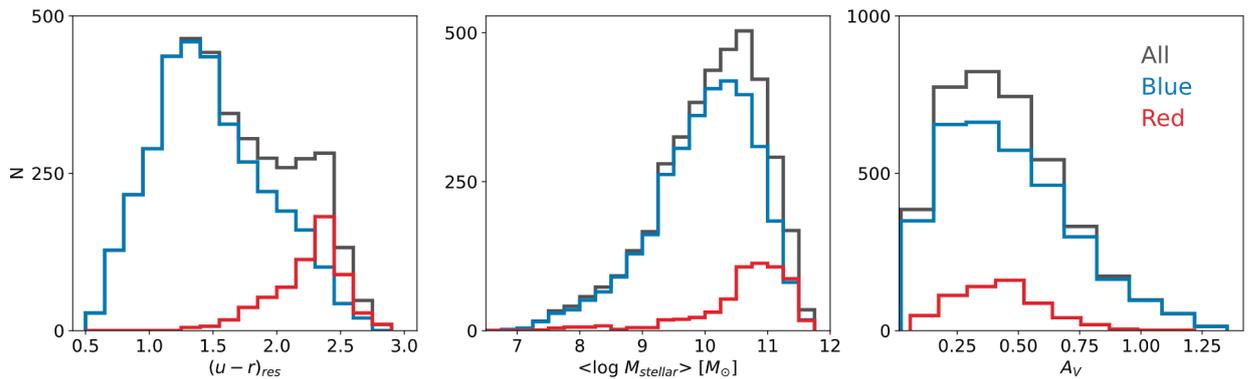


Рисунок 2.8 — Распределения физических свойств для двух популяций галактик для показателя цвета $(u - r)_{\text{res}}$ в системе, общей звездной массы, поглощения A_V . Полная выборка обозначена черной линией, галактики красной последовательности - красные, синего облака - синие.

Разделение галактик на две группы с использованием диаграммы показатель цвета - масса может быть оправдано либо различиями в эволюционном пути галактики, либо различиями в звездном составе. Далее мы обсудим зависимость свойств звездных популяций галактик от красного смещения. На рисунке 2.9 мы исследуем эволюцию истинного показателя цвета $(u-r)_{\text{int}}$, звездной массы и возраста галактик с красным смещением. Мы определяем средние оценки этих характеристик галактик для каждой ячейки по красному смещению. Красные и синие галактики распределены на этих диаграммах в соответствии с их звездной составляющей.

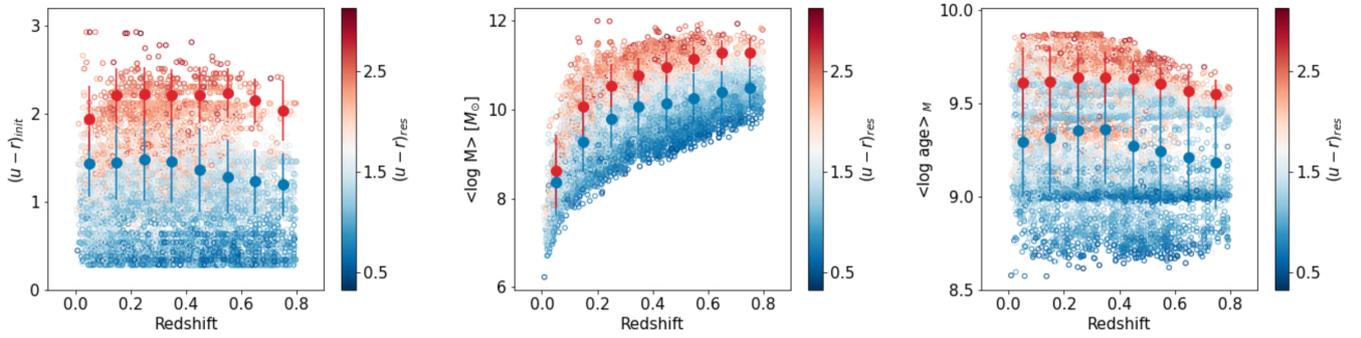


Рисунок 2.9 — Эволюция истинного показателя цвета в системе покоя, звездной массы и возраста галактик. Точки показывают средние значения каждого свойства в каждой ячейке красного смещения. Дисперсия по отношению к средним значениям показана в виде баров ошибок. Синие и красные точки соответствуют галактикам синего облака и красной последовательности соответственно.

Распределение цветов $(u-r)_{\text{int}}$ показывает, что как красные, так и синие галактики становятся голубее на больших красных смещениях. Для красных галактик первая ячейка красного смещения показывает немного более синий цвет $(u-r)_{\text{int}}$, чем для промежуточных красных смещений.

В среднем голубые галактики примерно на 0.8 dex легче красных. В то же время значительное уменьшение этой разницы наблюдается для галактик ближней Вселенной ($z \leq 0.1$), это может быть связано со сдвигом, вызванным тем, что слабые галактики становятся невидимыми с увеличением красного смещения. Кроме того, средняя масса в каждой из популяций галактик увеличивается с ростом красного смещения, что должно быть связано с той же причиной.

Галактики красной последовательности и голубого облака довольно хорошо разделены на диаграмме, показывающей звездный возраст. При любом

красном смещении красные галактики старше на ~ 0.35 dex. Вероятно, это следствие различных историй звездообразования и/или разницы в процессах образования синих и красных галактик. Возраст как синих, так и красных галактик уменьшается с увеличением красного смещения, что указывает на продолжающееся звездообразование и/или отражает смещенную выборку для галактик с малой массой при более высоких красных смещениях.

2.2.5 Плотность скорости звездообразования

Наиболее выдающимся результатом в изучении эволюции галактик с красным смещением является то, что плотность скорости звездообразования имеет пик при $z \sim 3$ и уменьшается до настоящего времени [115–121].

Чтобы изучить плотность скорости звездообразования (SFRD), необходимо изучить неполноту выборки галактик и пределы обнаружения звездной массы в зависимости от красного смещения. Необходимо найти минимальное и максимальное красные смещения (z_{\min} и z_{\max}), при которых каждая галактика из выборки может быть обнаружена в связи с пределами детектирования обзора gMOSS. Выборка состоит из галактик в диапазоне от 15.1^m до 22.5^m в фильтре r SDSS, эти значения будут использованы в качестве ограничений. Чтобы оценить максимальное и минимальное красное смещение, мы использовали пределы обнаружения звездных величин в обзоре gMOSS и физические свойства, полученные с использованием кода SIGALE. Средние значения z_{\min} и z_{\max} были получены в ячейках по звездной массе с шириной $\Delta \log(M) = 0.2$ dex.

На рисунке 2.10 показан результат оценок предела обнаружения звездной массы в зависимости от красного смещения. Галактики с массой $\log(M)_{[M_{\odot}]} \sim 10$ dex могут быть обнаружены во всем диапазоне красных смещений ($z \leq 0.8$), представленном в выборке объектов. Галактики с малой массой $\log(M)_{[M_{\odot}]} \sim 8.0$ обнаруживаются до $z = 0.15$. Также рисунок 2.10 показывает, что мы можем изучать выборки галактик из обзора со звездными массами выше $\log(M)_{[M_{\odot}]} \sim 8.9, 9.5$ и 9.9 dex при $z = 0.4, 0.6$ и 0.8 соответственно.

Таким образом, полученные результаты позволяют нам непосредственно изучать SFRD для галактик в диапазоне красного смещения до $z \leq 0.15$, исполь-

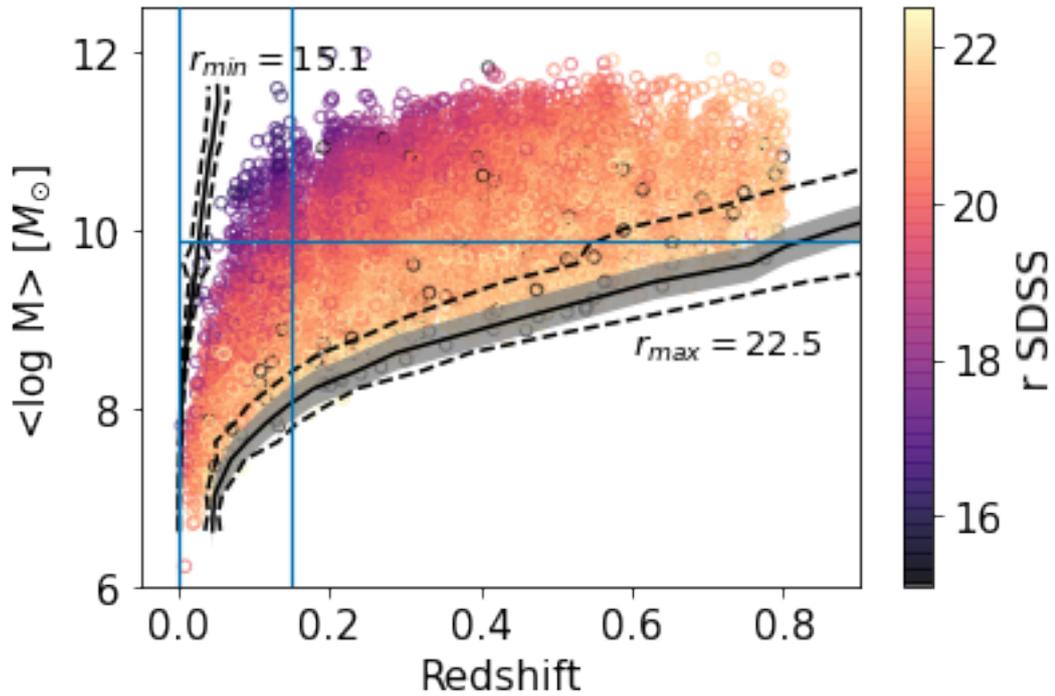


Рисунок 2.10 — Распределение красных смещений и звездных масс, полученных с помощью SIGALE для каждой галактики в общей выборке.

Черные линии показывают значения z_{\max} и z_{\min} , которые соответствуют предельным звездным величинам от 15.1^m до 22.5^m в обзоре галактик gMOSS. Заштрихованные области иллюстрируют дисперсию предельных величин по оси y , а пунктирные линии - дисперсию по оси x . Синие линии показывают подвыборку галактик с $z \leq 0.15$, используемую для изучения эволюции плотности скорости звездообразования. Цветовой бар показывает звездные величины галактик в фильтре r SDSS.

зую историю звездообразования для галактик выборки, полученной с помощью кода SIGALE. На верхней границе диапазона красного смещения ($z = 0.15$) выборка галактик включает галактики с массой выше $10^8 M_{\odot}$. Галактики с массой ниже этого предела вносят значительный вклад в историю звездообразования последние 4 миллиарда лет. В исследуемой выборке галактик такие галактики обнаруживаются в диапазоне красного смещения до $z = 0.15$, однако их количество не позволяет оценить неполноту их выборки.

Чтобы получить SFRD, учитывая эффект неполноты выборки, мы разделили скорость звездообразования каждой галактики в диапазоне красного смещения $0.05 \leq z \leq 0.15$, на ее максимальный сопутствующий объем (V_{\max}). Поскольку только небольшое число галактик с массой ниже $10^8 M_{\odot}$ не наблю-

дается при $z = 0.15$ ($\sim 3\%$), можно предположить, что V_{\max} равен сопутствующему объему V_c в этом диапазоне красного смещения:

$$V_{\max} = \Delta V = V_c(z = 0.15) - V_c(z = 0.005). \quad (2.2)$$

Однако ячейка красного смещения $0.05 \leq z \leq 0.15$ включает небольшое количество галактик из общей выборки (1250 галактик), поэтому также необходимо оценить космическую дисперсию для этого диапазона красного смещения в области обзора ($\sim 2.386 \square^\circ$). Мы использовали уравнения для космической дисперсии, полученные в работе [122], и получили оценку космической дисперсии 39.3% для наших параметров обзора. Это значение довольно велико и может объяснить различия между значениями SFRD, оцененными для одного и того же интервала красного смещения в разных статьях.

Скорости звездообразования в галактиках были получены с помощью параметрической функции истории звездообразования с задержкой и необязательной экспоненциальной вспышкой звездообразования разрешением 1 млрд. лет:

$$\text{SFR} \propto \frac{t}{\tau^2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (2.3)$$

где $0 \leq t \leq t_0$ с t_0 - возраст начала звездообразования, а τ - время его пика. Такая функциональная форма обеспечивает почти линейное увеличение SFR с начала звездообразования, а после достижения максимума при $t = \tau$ оно плавно уменьшается.

Ошибка $\log \rho$ в каждую эпоху получается путем распространения дисперсии SFRD на каждую ячейку. Результаты, показанные на рисунке 2.11, демонстрируют, что $\log \rho$ увеличивается с красным смещением до $z \sim 3.0$, а затем уменьшается.

Мы сравнили полученные результаты с уже известными в литературе в работах [31; 72; 120; 121; 123–126]. Эти результаты получены на основе различных выборок данных и с использованием различных методов анализа. В целом, мы пришли к выводу, что анализ выборки галактик из обзора gMOSS дает результаты, которые хорошо согласуются как с результатами космологических обзоров [120; 121] так и анализом близлежащих галактик из работ SDSS [123], IFS CALIFA [31] и GAMA [126].

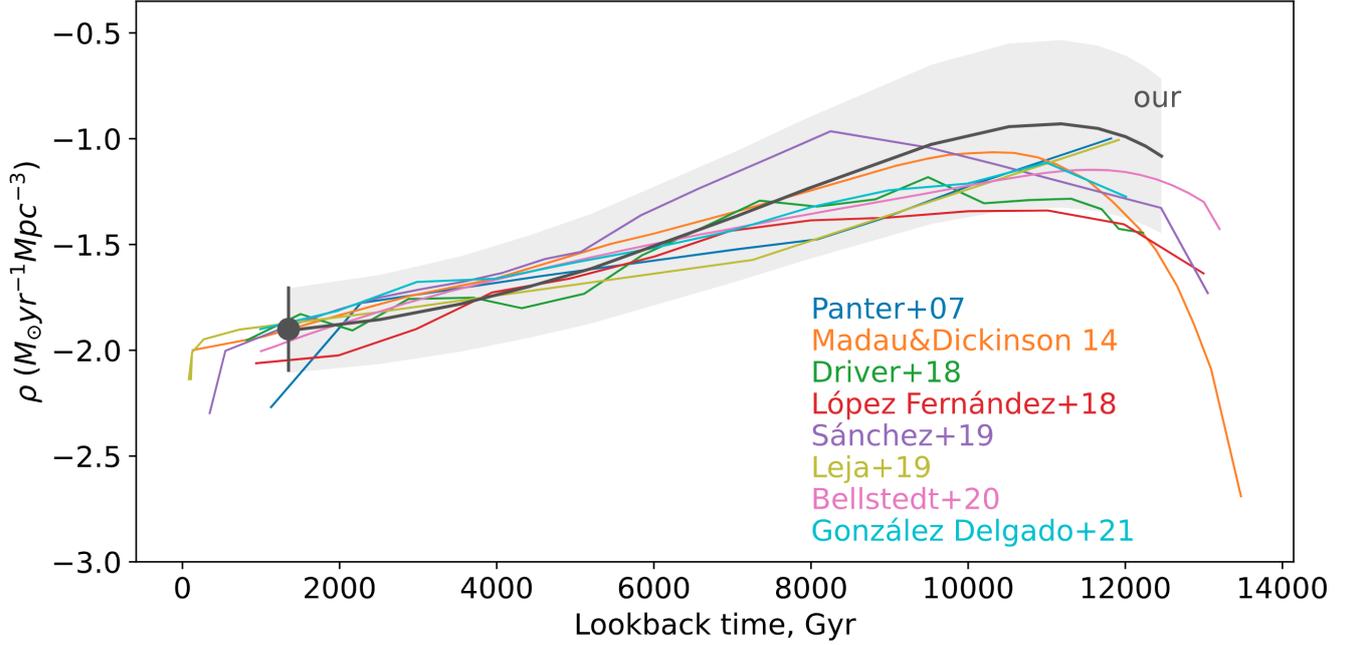


Рисунок 2.11 — Эволюция SFRD со временем была получена из результатов аппроксимации спектральных распределений энергии (серая линия) для близких галактик ($0.05 \leq z \leq 0.15$, серая точка). Серая теневая область показывает дисперсию полученных результатов. Различные цветные линии показывают SFRD, полученные в других работах.

2.2.6 Плотность звездной массы

Учитывая эффект неполноты объема из раздела 2.2.5, мы можем рассчитать плотность звездной массы (SMD) как отношение суммы звездных масс каждой галактики, полученных с использованием кода SIGALE, к сопутствующему объему (V_{\max}) в диапазоне красного смещения $0.05 \leq z \leq 0.15$. Для других диапазонов красного смещения значение SMD вычисляется путем интегрирования функции SFRD по времени.

Рисунок 2.12 показывает плотность звездной массы как функцию времени, сравнивая со следующими работами [120] (синие точки), [31] (оранжевая сплошная линия), [121] (зеленые точки) и [124] (фиолетовые точки). Как и в случае с SFRD (z), тенденция аналогична тем, о которых написано в предыдущих исследованиях, основанных на крупных космологических обзорах. SMD быстро растет в ранние космологические эпохи, увеличиваясь с $\sim 10^{6.5} M_{\odot} \text{ Mpc}^{-3}$ в первые 3 - 4 млрд. лет, достигая уровня выше $\sim 10^{8.2} M_{\odot} \text{ Mpc}^{-3}$ к текущей эпохе.

Эта форма кривой SMB была хорошо описана в работах, основанных на космологических исследованиях [31; 120] и других. Полученный результат несколько ниже значений из предыдущих исследований, что объясняется разницей в работе алгоритмов аппроксимации спектральных распределений энергии, а также уже упомянутой космической дисперсией.

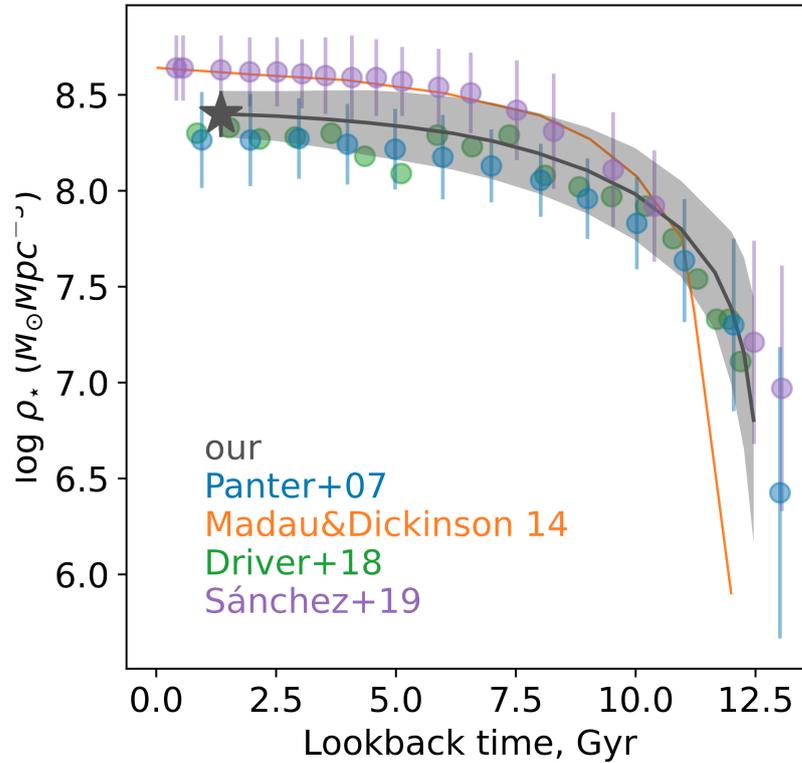


Рисунок 2.12 — Эволюция SMD со временем была получена из результатов аппроксимации SED (серая линия) для близких галактик ($0.05 \leq z \leq 0.15$, звезда) и интегрирования функции SFRD. Область серой тени соответствует неопределенности результата. Различные цветные линии и маркеры показывают SMD, полученные в других работах.

2.3 Выводы и результаты главы 2

Глава посвящена исследованию эволюции свойств звездных популяций галактик выборки, полученной в первой главе. Обсуждаются свойства звездных популяций галактик выборки и методы их получения. Обосновывается выбор программного обеспечения для аппроксимации спектральных распределений

энергии галактик - код SIGALE. В ходе анализа распределения полученных свойств звездных населений отмечается бимодальность распределения показателя цвета $(u - r)_{\text{res}}$ в системе покоя, которая указывает на две основные популяции галактик: голубое облако и красную последовательность. Приведена точность полученных оценок физических параметров галактик и показано, что ее оценки близки к оценкам, полученным по результатам узкополосных обзоров: для возраста основного звездного населения - $\sigma(\log(\text{age})_{\text{L}}) = 0.05 \pm 0.04$ dex, 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.

Далее в Главе исследуются вопросы эволюции галактик со временем. Галактики разделяются на две популяции с помощью диаграммы масса - возраст, с учетом поправки на поглощение для показателя цвета $(u - r)_{\text{res}}$ в системе покоя. Приводятся формулы для разделения галактик на красную и синюю популяции при помощи показателя цвета $(u - r)_{\text{res}}$ в системе покоя с поправкой на поглощение. Дано описание физических свойств полученных популяций. Основные научные результаты главы заключаются в непосредственном определении плотности скорости звездообразования и плотности звездной массы для галактик массой выше $10^{8.3} M_{\odot}$ в диапазоне красного смещения $0.05 \leq z \leq 0.15$: $\text{SFRD} = -1.907 \pm 0.2 M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{pc}^{-3}$ и $\log(\rho_*) = 8.12 \pm 0.18 M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{pc}^{-3}$.

Глава 3. Анализ крупномасштабного распределения галактик поля HS 47.5-22

3.1 Методы анализа крупномасштабного распределения галактик

Скопления галактик являются одними из крупнейших гравитационно-связанных систем во Вселенной и могут содержать сотни и тысячи галактик. Первые каталоги групп и скоплений галактик были составлены визуально [127; 128]. Первые же алгоритмы автоматического поиска групп и скоплений были разработаны в 1980-х годах путем простого подсчета галактик, проецируемых на небольшую часть поля [129; 130]. К наиболее популярным современным методам обнаружения групп и скоплений галактик относятся детектирование рентгеновского излучения горячего газа [131], эффект Сюняева-Зельдовича для реликтового микроволнового фона [132], смещение изображения далёких галактик, вызванное эффектом гравитационной линзы [133], избыточная плотность галактик на изображениях в оптическом, ближнем или среднем ИК диапазоне [134].

Первые алгоритмы выделения групп и скоплений галактик в оптическом диапазоне были выполнены на основе сравнения функций распределения объектов с распределением Пуассона [64; 135]. Дальнейшие исследования крупномасштабной структуры были выполнены с использованием алгоритмов кластеризации: минимального остовного дерева (MST) [136]; алгоритмом "friends-of-friends" [137]; сравнением корреляционных функций [138]; диаграммами Вороного [139]. Общая идея алгоритмов фильтрации основана на том факте, что любые кластеры в данных демонстрируют в некоторый контраст плотности по сравнению со средней плотностью для всех данных.

Эволюция и физические свойства галактик тесно связаны со свойствами окружающей их среды. Первой была открыта зависимость морфологии галактик от плотности окружающей среды [3; 4]. В следующих исследованиях было показано, что зависимость морфологии от окружающей среды существует не только для групп и скоплений галактик, но и для всего диапазона локальных плотностей вплоть до галактик поля [5–7]. Позже было обнаружено, что другие

физические свойства галактик коррелируют также с плотностью окружающей среды. Локальная плотность влияет на цветовые избытки, эквивалентную ширину линии H_α и величину скачка $D4000 \text{ \AA}$ [8], скорость звездообразования для галактик на близких красных смещениях [55].

3.1.1 Диаграммы Вороного

Диаграммой Вороного называется геометрическое разбиение плоскости на многоугольники такое, что для любого центра p_i системы точек можно указать область пространства (многогранник или область Вороного), все точки которой ближе к данному центру, чем к любому другому центру системы [140]. В качестве вершин областей Вороного в работе используются галактики из каталога, полученного в главе 1. Процедура разбиения двумерной проекции трехмерного слоя крупномасштабного распределения галактик проведена с помощью функции `voronoi` в среде MatLab. На рисунке 3.1 показано разбиение тонкого слоя крупномасштабного распределения галактик при помощи диаграммы Вороного.

Величина δ_i , обратная к площади области Вороного, была принята как численная плотность, соответствующей каждой галактике-вершине многогранника. Группы галактик выделяются по пикам в контрасте плотности для поля распределения галактик. Контраст плотности определяется как

$$\bar{\sigma}_i = \frac{(\delta_i - \bar{\delta})}{\bar{\delta}}, \quad (3.1)$$

а средняя плотность для слоя:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad (3.2)$$

где A_i – площадь многогранника Вороного для i -ой галактики, а n – количество ячеек Вороного в исследуемом слое [141]. При расчете средней плотности не учитываются краевые точки, ячейки Вороного для которых уходят на бесконечность.

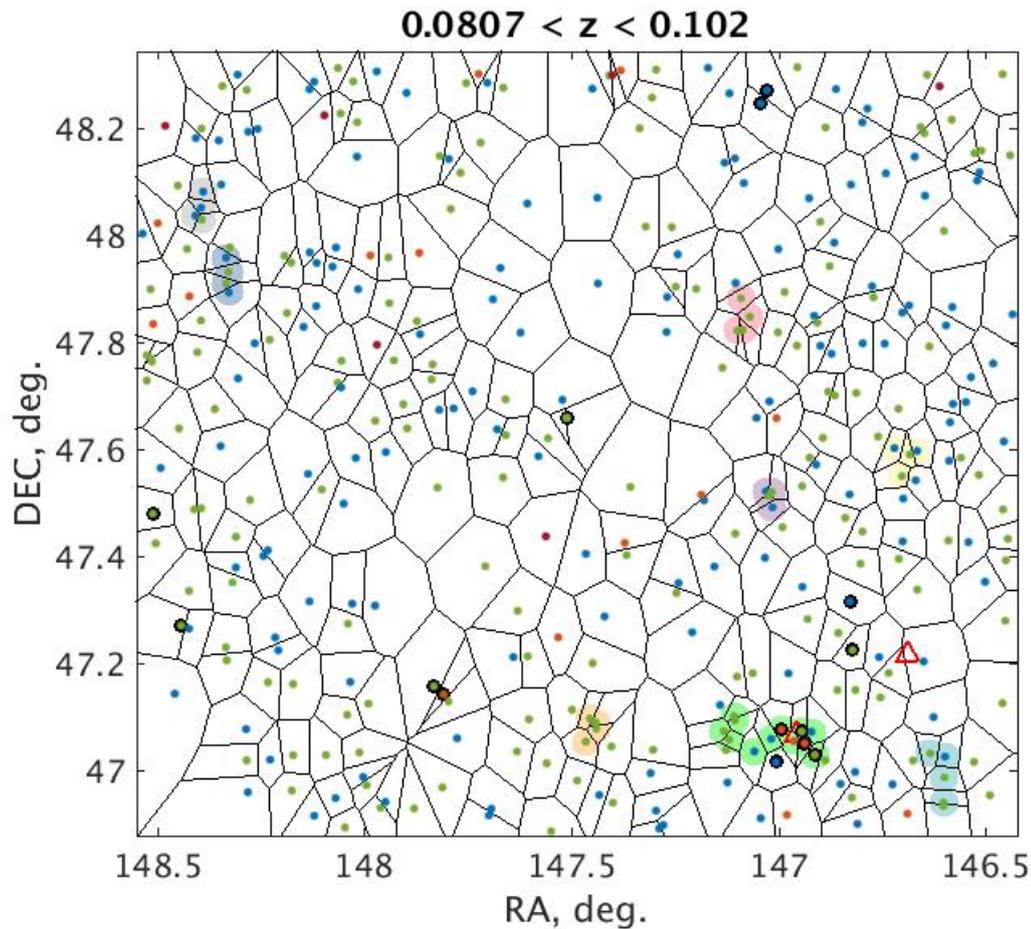


Рисунок 3.1 — Пример разбиения плоскости с набором галактик в тонком слое крупномасштабного распределения галактик. Цвет точек, показывающих набор галактик, кодирует их спектральный тип: красным цветом обозначены галактик ранних типов, зеленым - поздних, синим - галактики со вспышкой звездообразования. Черный контур вокруг галактики обозначает наличие спектрального красного смещения. Отдельные полученные скопления выделены цветом.

3.1.2 Алгоритм определения поверхностной плотности

Алгоритм основан на определении поверхностной плотности распределения галактик в тонких слоях крупномасштабного распределения галактик. Пример результата работы алгоритма определения поверхностной плотности показан на рисунке 3.2.

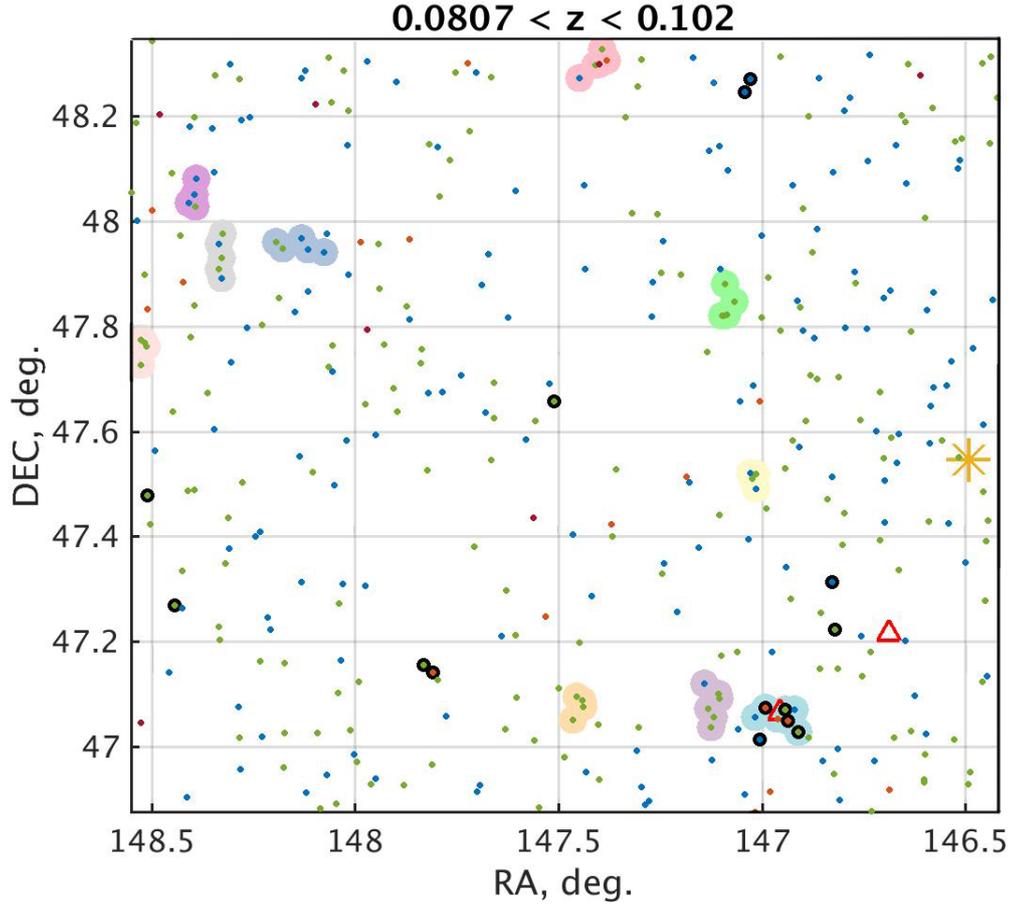


Рисунок 3.2 — Карты контраста плотности, полученные при использовании адаптивной апертуры. Цвет точек, показывающих набор галактик, кодирует их спектральный тип: красным цветом обозначены галактик ранних типов, зеленым - поздних, синим - галактики со вспышкой звездообразования. Черный контур вокруг галактики обозначает наличие спектрального красного смещения. Отдельные полученные скопления выделены цветом.

Плотность распределения галактик определялась в окрестности каждой исследуемой галактики как:

$$\delta_i = \frac{s}{\frac{4}{3}\pi R^3} \quad (3.3)$$

Ширина окрестности R , называемая адаптивной апертурой, на которой происходило сглаживание значения плотности галактик, определялась расстоянием от галактики до s -ого ближайшего соседа как трехмерное расстояние между исследуемой i -ой галактикой и ее j -ым соседом [142, с. 5]:

$$R = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2} \quad (3.4)$$

где прямоугольные координаты x , y , z вычислены по формулам перехода от сферической к прямоугольной системе координат:

$$X_i = R_i \cdot r_i \cdot \sin \Theta_i \cdot \cos \phi_i \quad (3.5)$$

$$Y_i = R_i \cdot r_i \cdot \sin \Theta_i \cdot \sin \phi_i \quad (3.6)$$

$$Z_i = R_i \cdot r_i \cdot \cos \Theta_i \quad (3.7)$$

Углы $\Theta_i = (\frac{\pi}{2} - DEC)$, $\phi_i = RA$ получены из координат прямого восхождения RA и склонения DEC , все значения углов указаны в радианах. $R_i = 1/(1 + z_i)$ – масштабирующий фактор, z_i – соответствующее красное смещение i -ой галактики. Сопутствующее расстояние r_i до i -ой галактики вычисляется по формуле [143, с. 76], стр.76:

$$r_i = \frac{c}{H_0} \int_0^{z_i} (\Omega_M \cdot (1 + z_i)^3 + 1 - \Omega_M)^{-0.5} dz \quad (3.8)$$

Скопления и группы галактик определяются как пики на картах контраста плотности распределения галактик. Для того, чтобы обозначить положение пиков плотности, средняя плотность в слое определяется как:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (3.9)$$

Здесь n - количество галактик в каждом слое. Далее вычисляется контраст плотности для каждой галактики $\sigma_i = (\delta_i - \bar{\delta})/\bar{\delta}$ и производится интерполяция значений контраста плотности по всему полю.

3.1.3 Алгоритм машинного обучения OPTICS

Алгоритм машинного обучения OPTICS [144] - это надежный инструмент для иерархической идентификации структуры на основе плотности в любом n -мерном наборе данных, для которого может быть определена метрика расстояния. Он применялся в различных областях для количественной оценки пове-

дения и моделей мобильности человека [40], характеристики геномного разнообразия пшеницы [145], оптимизации распределения городских систем энергообеспечения [146] и многих других.

Поскольку в алгоритме используется метрика расстояния, то для наборов данных, содержащих переменные с несовместимыми единицами измерения, могут возникнуть трудности с ее выбором. Однако, учитывая, что каталог галактик по сути является набором пространственных координат, выбор метрики расстояния очевиден - это евклидово расстояние. Эта данность делает применение OPTICS к физической кластеризации галактик в трехмерном пространстве весьма надежным. Несмотря на это, OPTICS применялся в астрофизических работах лишь несколько раз [147—151].

Возможности OPTICS отчасти объясняются минимальным вводом данных со стороны пользователя. OPTICS требует, чтобы пользователь указал только два параметра, N_{min} и ϵ . Эти параметры выбираются в соответствии с набором данных и являются достаточно надежными, чтобы небольшие изменения в их выборе не сильно влияли на график достижимости или определение каких-либо кластеров, присутствующих в данных.

Параметр ϵ - это радиус, для которого выполняется запрос радиуса ближайшего соседа для каждой точки в наборе данных, и, следовательно, это также наибольшее возможное расстояние достижимости для любой точки. Подходящий выбор ϵ производится путем рассмотрения компромисса между наименее плотными структурами, которые пользователь хочет обнаружить, а также временем выполнения алгоритма.

Параметр N_{min} - это минимальное количество точек, которое должна содержать структура, чтобы ее можно было обнаружить как кластер. Этот параметр также является основополагающим при расчете расстояния достижимости. Увеличение N_{min} уменьшает шум на графике достижимости, но ограничивает наименьшие возможные структуры, определяемые кластерами, содержащими не менее N_{min} точек.

Точка ρ является основной точкой, если в пределах ее ϵ -окрестности $N_\epsilon(\rho)$ найдено не менее $minPts$ точек (включая ρ). Для каждой точки вычисляется основное расстояние, которое вычисляет расстояние до минимальной ближайшей точки:

$$core - dist_{\epsilon, MinPts} = \begin{cases} Undefined & |N_{\epsilon}(\rho)| < MinPts \\ MinPts - th N_{\epsilon}(\rho) & |N_{\epsilon}(\rho)| \geq MinPts, \end{cases} \quad (3.10)$$

где $minPts - th N_{\epsilon}(\rho)$ - расстояние до $MinPts$ -й ближайшей точки $N_{\epsilon}(\rho)$ в порядке возрастания.

Расстояние достижимости точки o от точки ρ равно максимальному расстоянию между o и ρ и расстоянию до ядра точки ρ :

$$\begin{aligned} reachability - dist_{\epsilon, MinPts}(o, \rho) &= \\ &= \begin{cases} Undefined & |N_{\epsilon}(\rho)| < MinPts \\ \max(core - dist_{\epsilon, MinPts}, dist(o, \rho)) & |N_{\epsilon}(\rho)| \geq MinPts \end{cases} \end{aligned} \quad (3.11)$$

На основе параметра расстояние достижимости алгоритм OPTICS строит так называемый график достижимости, на котором номера точек нанесены вдоль оси x в порядке их обработки алгоритмом, а расстояние достижимости - вдоль оси y . Используя график достижимости (который является специальным видом дендрограммы), легко получить иерархическую структуру кластеров. Точки одного кластера имеют небольшое расстояние достижимости до ближайшего соседа, поэтому кластеры выглядят как долины на графике достижимости.

На рисунке 3.3 показано распределение галактик одного слоя ($0.3605 < z < 0.3722$) трехмерного конуса крупномасштабного распределения галактик (*вверху*) и график достижимости (*внизу*) точек, на основе которых определяются группы галактик. Пунктирной линией показан параметр ϵ -окрестности, вдоль которого проходит линия отсечения достаточно плотных кластеров. На рисунке показано, что алгоритм позволяет хорошо разделять близко расположенные кластеры данных.

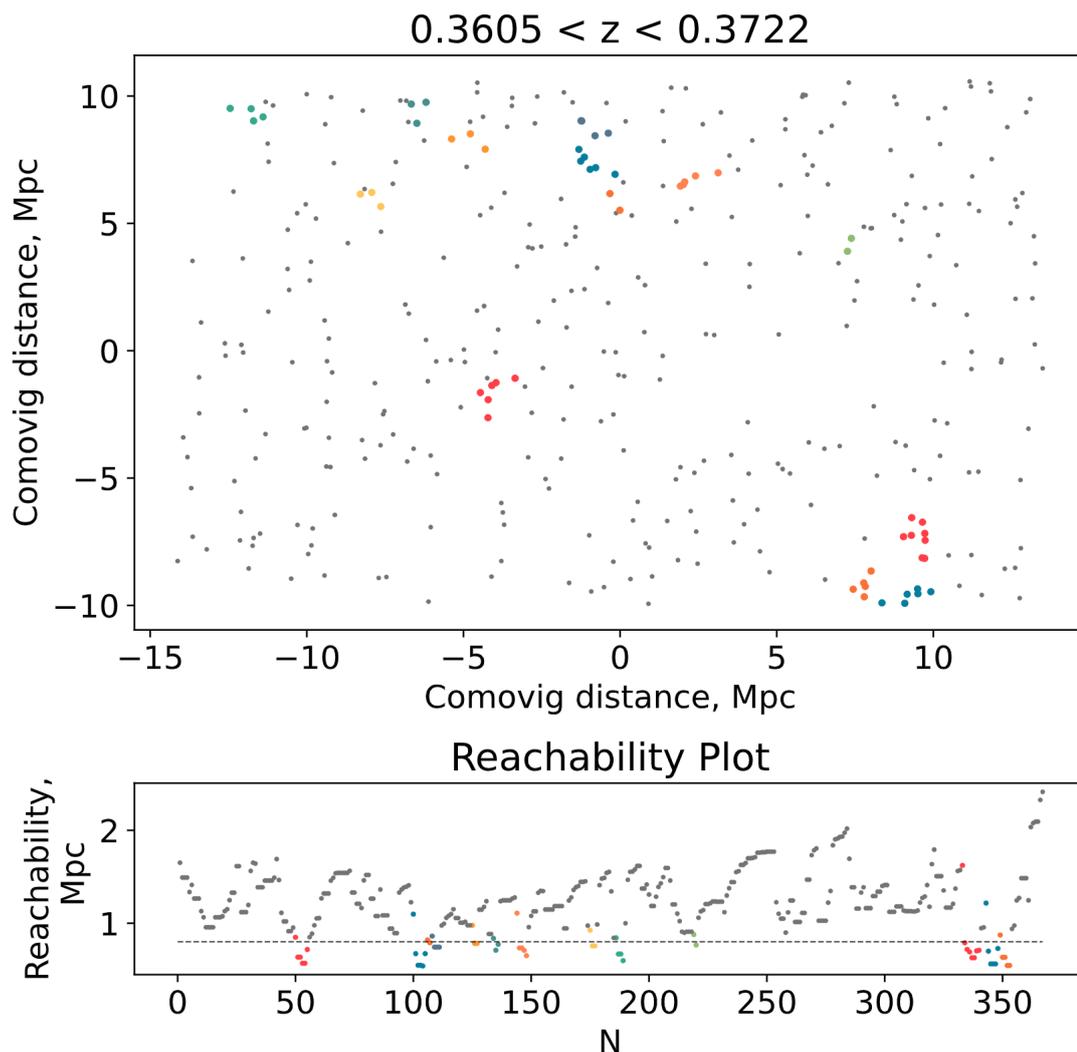


Рисунок 3.3 — *Верхняя панель*: Распределение галактик в тонком срезе ($0.3605 < z < 0.3722$) трехмерного крупномасштабного распределения галактик. Оси X и Y представлены на соответствующем расстоянии от центра поля. *Нижняя панель*: График достижимости. N показывает, в каком порядке точки были обработаны алгоритмом. Расстояние достижимости - это расстояние до *minPts*-го ближайшего соседа. Пунктирной линией показан параметр ϵ -окрестности, который определяет значение плотности, ниже которого набор точек будет считаться кластером. На обоих рисунках цветные точки - галактики обнаруженных скоплений, серые точки - галактики поля. Цвета обнаруженных кластеров соответствуют друг другу на верхней и нижней панелях.

В машинном обучении параметры, используемые для управления процессом обучения, называются гиперпараметрами. Для их оптимизации используются различные стратегии: поиск по сетке, случайный поиск, байесовская оп-

тимизация, оптимизация на основе градиентов, эволюционная оптимизация, оптимизация на основе населения и другие. Наиболее распространенным методом оптимизации гиперпараметров является поиск по сетке, который выполняет полный поиск по заданному вручную подмножеству пространства гиперпараметров алгоритма машинного обучения.

Для алгоритма OPTICS гиперпараметрами являются ϵ (*eps*) и *minPts*. Первый параметр является непрерывным, а второй - дискретным. Для поиска по сетке выбирается конечный набор "разумных" значений. Затем поиск по сетке запускает алгоритм OPTICS для каждой пары $(\epsilon, \text{minPts})$ в декартовом произведении этих двух наборов и проверяет статистические параметры для выбранных параметров на 10 модельных выборках из MICECAT. Для каждого из гиперпараметров мы можем выбрать набор "разумных" значений, основанных на физических свойствах скоплений галактик. Для параметра ϵ следует учитывать типичный размер галактических скоплений, а для параметра *minPts* - минимальное количество галактик, которое считается группой. Учет этих физических параметров помогает выбрать начальные значения для поиска по сетке, однако эти значения не обязательно должны быть оптимальными для алгоритма OPTICS. На первой итерации поиска по сетке мы используем довольно широкую "сетку" для поиска по сетке. После этого мы получаем оптимальную пару параметров, вокруг которых строим новую сетку с меньшей ячейкой. Затем мы снова запускаем поиск по сетке. Итерация параметров заканчивается, когда увеличение статистических параметров качества мало меняется на новом наборе гиперпараметров.

Выборка галактик ограничена по величине, поэтому средняя плотность галактик уменьшается с увеличением красного смещения. Поэтому мы выбрали стратегию выбора оптимальных параметров на основе модельных данных и их последующей калибровки по скоплениям и группам галактик, найденных в изучаемой области в предыдущих работах.

Оптимальный набор входных параметров алгоритма оценивался с использованием статистических параметров, которые подробно описаны в разделе **3.2.1.**

3.1.4 Разбиение светового конуса на тонкие слои

Поскольку используемые алгоритмы являются двумерными, то для анализа крупномасштабного распределения галактик с их помощью было использовано разбиение полного луча зрения на тонкие слои в соответствии с красным смещением.

Для детектирования сгущений плотности в крупномасштабном распределении галактик важна согласованность между шириной слоя, в котором происходит выделение структур, и точностью определения фотометрического красного смещения галактик. Слишком тонкие слои по красному смещению приводят к недоопределению структур и их членов. При использовании слишком широких слоев возникает эффект проекции галактик с отличным красным смещением на крупномасштабные структуры, которым они не принадлежат.

Точность определения фотометрических красных смещений для каталога галактик, описанного в Главе 1, составляет $\sigma_z < 0.005$. Исходя из этого значения требуемая ширина слоя по красному смещению: $\Delta z = 2\sigma_z(1+z)$ или $\Delta z = 0.01(1+z)$. Дополнительно к каждому интервалу было добавлено по 25% от его значения с каждой стороны для того, чтобы исключить потери в определении плотности крупномасштабного распределения галактик на границе слоев.

3.2 Статистическая оценка результатов работы алгоритмов

3.2.1 Основные статистические выкладки для оценки качества работы алгоритмов

Поскольку в модельном каталоге галактик MICE существует параметр, определяющий принадлежность галактики к скоплению, то возможно оценить качество разработанных алгоритмов статическими методами. В работе использованы критерии статистических оценок из работ Gerke и др. [50] и Knobel и др. [152]. Согласно им, считается, что группа i соответствует группе j , если группа

j содержит более чем $f\%$ галактик группы i . В рамках работы принято, что группа i соответствует группе j , если группа j содержит более 50% галактик группы i .

Определим термины полноты и чистоты выборки. Обозначим N_{real}^{gr} - число групп галактик в модельной выборке, N_{rec}^{gr} - число групп, определенных программными алгоритмами. Тогда полнота выборки групп, соответствующих группам, определенным по идентификаторам гало темной материи групп модельной выборки, вычисляется как

$$c = \frac{N_{real}^{gr} \rightarrow N_{rec}^{gr}}{N_{real}^{gr}}, \quad (3.12)$$

где $N_{real}^{gr} \rightarrow N_{rec}^{gr}$ - количество соответствий реальных групп из каталога группам, определенным программно.

Аналогично вычисляется чистота выборки:

$$p = \frac{N_{rec}^{gr} \rightarrow N_{real}^{gr}}{N_{rec}^{gr}}, \quad (3.13)$$

Эти параметры могут принимать значения от 0 до 1. Близкое к 1 значение параметра c показывает, что количество неопределенных групп из каталогов мало. Для параметра p такое значение показывает малую долю ложно-детектированных скоплений.

Статистические параметры c и p характеризуют работу алгоритмов для групп галактик. Чтобы оценить ее для галактик в группах, обозначим выборку галактик в группах модельной выборки как S_{real}^{gal} , а выборку галактик программно выделенных групп как S_{rec}^{gal} . Далее введем параметр, показывающий процент успешно определенных галактик из модельной выборки:

$$S_{gal} = \frac{S_{real}^{gal} \cap S_{rec}^{gal}}{S_{real}^{gal}} \quad (3.14)$$

Знаменатель выражения равен количеству одинаковых галактик в выборках S_{real}^{gal} и S_{rec}^{gal} . Этот параметр показывает какая часть галактик из групп модельной выборки была определена алгоритмом как галактики групп.

Второй параметр характеризующий работу программных алгоритмов для галактик - процент отскоков. Это часть всех галактик, программно выделенных

в скопления, которые в модельной выборке являются галактиками поля.

$$f_I = \frac{S_{rec}^{gal} \cap S_{field}^{gal}}{S_{rec}^{gal}} \quad (3.15)$$

Параметры S_{gal} и f_I также могут принимать значение от 0 до 1.

Очевидно, что получить идеальное соответствие между модельной выборкой и определенными программно группами невозможно. Однако, можно оптимизировать работу алгоритмов исходя из представленных выше параметров с помощью параметров качества полученных выборок, которые определены следующим образом:

$$g_1 = \sqrt{(1 - c)^2 + (1 - p)^2}, \quad (3.16)$$

$$g_2 = \sqrt{(1 - S_{gal})^2 + f_I^2}. \quad (3.17)$$

Параметр g_1 показывает баланс между параметрами полноты и чистоты полученных наборов групп галактик, параметр g_2 – схож с параметром g_1 , но, в отличие от параметра g_1 , который характеризует детектирование групп галактик относительно групп в каталоге, он показывает соотношение между отдельными детектируемыми галактиками и группами. Оба параметра могут принимать значения от 0 до 1. При сравнении статистических параметров для полученных наборов детектированных групп необходимо стремиться к минимизации параметров g_1 и g_2 .

3.2.2 Модельные выборки галактик из симуляции светового конуса MICECAT

Чтобы протестировать алгоритмы поиска групп галактик, были использованы 10 независимых выборок данных из моделирования задачи n-тел для светового конуса коллаборации MICE [153–157] портала CosmoHub [158; 159]. Все выборки имеют те же параметры, что и данные наблюдений: общая площадь каждого образца составляет $\sim 2.0 \square^\circ$, ограничение по звездной величина в фильтре r SDSS 22.5^m , диапазон красного смещения $0 \leq z \leq 0.8$. Космо-

логические параметры модели: $\Omega_M = 0.25$, $\sigma_8 = 0.8$, $n_s = 0.95$, $\Omega_b = 0.044$, $\Omega_\Lambda = 0.75$, $h=0.7$.

Данные из модельного каталога MICECAT содержат информацию об идентификаторе гало темной материи, которому принадлежит каждая галактика. Галактики с одинаковым идентификатором гало связаны гравитацией и находятся в одном скоплении. Это позволяет тестировать алгоритмы поиска скоплений с использованием данных MICECAT и оценивать статистические параметры выборки кластеров, такие как полнота, чистота, процент верно определенных галактик - членов скоплений и долю галактик поля, определенных как галактики скоплений (подробнее см. в разделе 3.1.3). Среднее количество галактик в выборках из симуляции на единицу красного смещения показано на рисунке 3.4. Среднее количество галактик на единицу красного смещения в выборках из симуляции довольно близко к распределению галактик по красному смещению в данных реального каталога из Главы 1.

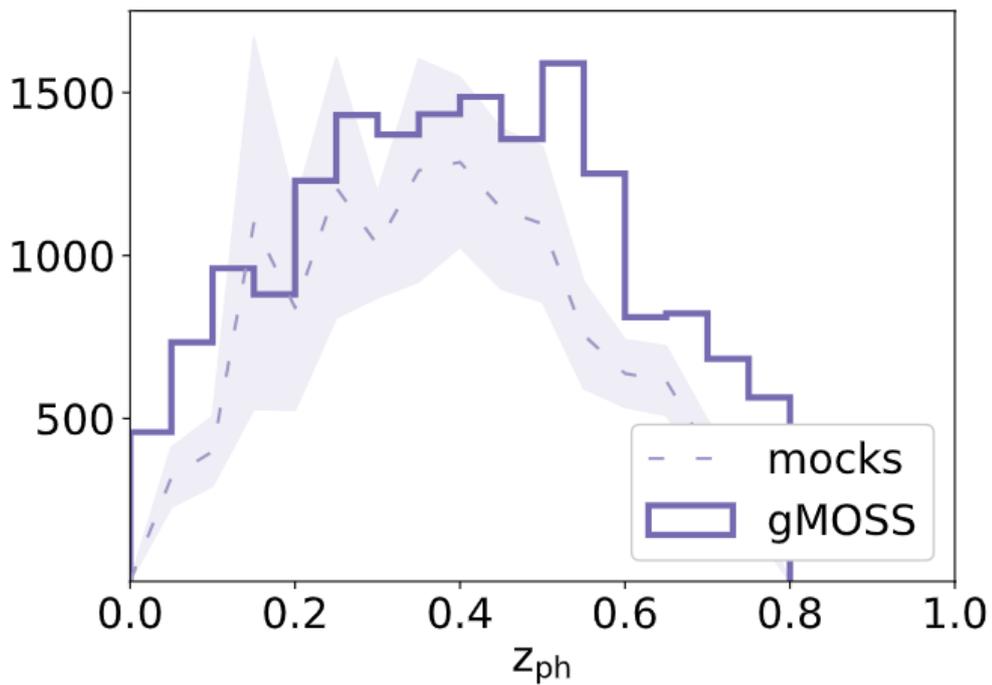


Рисунок 3.4 — Распределение числа галактик по красному смещению. Гистограмма показывает распределение галактик в реальном каталоге из Главы 1. Пунктирная линия показывает среднее число распределения галактик по красному смещению для 10 выборок из симуляции, а заштрихованная область - их разброс.

3.2.3 Результаты сравнения эффективности алгоритмов

Исследуемые методы анализа крупномасштабного распределения галактик вычисляют двумерную поверхностную плотность окружения в каждом слое красного смещения, а не истинную объемную плотность. Прямое определение объемных плотностей в трехмерном режиме требует более точных красных смещений. Для проведения таких исследований точность определения красных смещений должна быть по крайней мере 10 раз выше, что соответствует точности определения спектральных красных смещений. В целом можно ожидать пропорциональности между спроецированными двумерными и истинными трехмерными плотностями, если толщина слоев по красному смещению определена оптимально.

Очевидно, что невозможно получить идеальное соответствие между модельным каталогом и группами, которые были выделены алгоритмом. Однако, основываясь на статистических параметрах, можно выбрать оптимальный алгоритм и его параметры для определения групп галактик, основываясь на результатах работы алгоритмов для выборок из модельного каталога, которые имеют информацию о принадлежности галактик к группам. Для всех трех алгоритмов определения групп галактик были рассчитаны все статистические параметры полученных наборов групп, а также параметры качества.

На рисунке 3.5 показано распределение параметров полноты и чистоты выборки групп галактик, а также доля успешно определенных галактик групп и доля галактик, ошибочно определенных как галактики групп для алгоритмов определения поверхностной плотности и диаграмм Вороного для всех наборов данных из модельного каталога MICE. Параметры, определенные для алгоритма определения поверхностной плотности показаны кружками, цвет соответствует номеру ближайшего соседа, до которого определялось расстояние для расчета поверхностной плотности. Параметры, определенные для алгоритма диаграмм Вороного показаны красными треугольниками. Видно, что статистические параметры для набора групп галактик, полученного с помощью алгоритма Вороного, превосходят параметры наборов групп, полученных с помощью алгоритма определения поверхностной плотности.

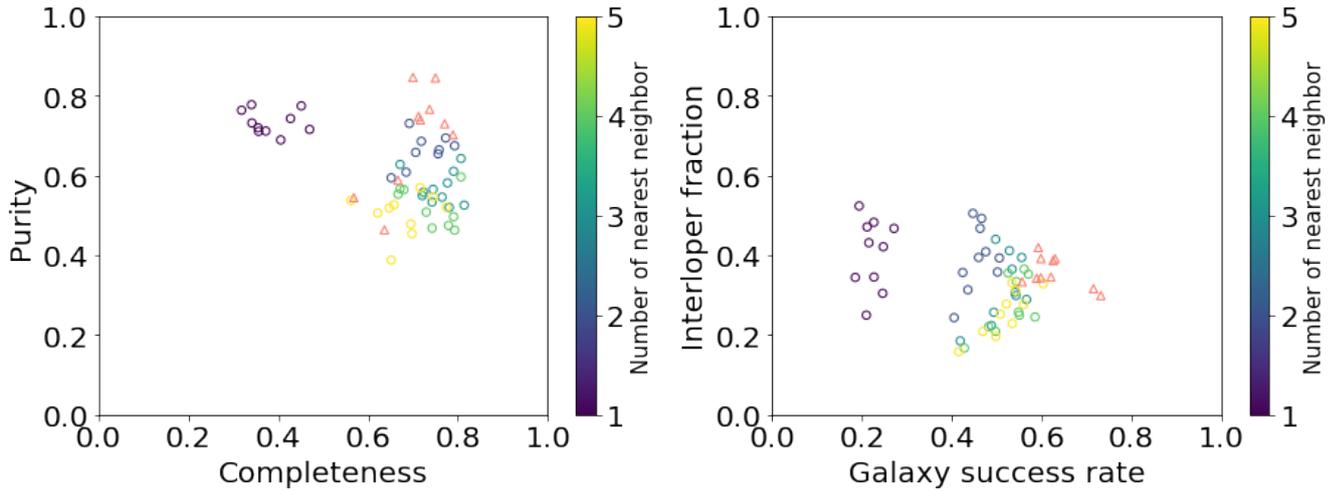


Рисунок 3.5 — Отношение статистических параметров для алгоритмов определения поверхностной плотности и диаграмм Вороного.

На рисунке 3.6 показаны параметры качества наборов групп, полученных с помощью алгоритма определения поверхностной плотности, для различных номеров ближайшего соседа, до которого определялось расстояние для расчета поверхностной плотности. Параметру g_1 соответствуют отметки синего цвета, g_2 - красного, серым показана полусумма параметров. Бары показывают разброс значений параметров на 10 выборках галактик. Необходимо минимизировать оба параметра g_1 и g_2 . Исходя из этого условия, оптимальным номером ближайшего соседа, до которого определялось расстояние для расчета поверхностной плотности, стоит считать $N = 3$. Его значения параметров качества: $g_1 = 0.43 \pm 0.04$ и $g_2 = 0.58 \pm 0.04$.

Для алгоритма диаграмм Вороного отсутствует варьируемый параметр, подобный параметру номера ближайшего соседа для алгоритма определения поверхностной плотности. Поэтому для него были сразу определены параметры качества: $g_1 = 0.49 \pm 0.13$ и $g_2 = 0.52 \pm 0.06$. Параметры качества получаемых выборок групп галактик выше для алгоритма диаграмм Вороного, при этом разброс их значений больше.

Для алгоритма OPTICS мы можем изменять входные параметры - eps описывающий максимальное расстояние, которое необходимо учитывать, а $minPts$ - минимальное количество точек, необходимое для формирования кластера. Мы использовали несколько итераций при выборе оптимальных параметров. При первоначальном выборе параметров мы исходили из типичных размеров скопления галактик и количества их членов. Таким образом, начальный набор па-

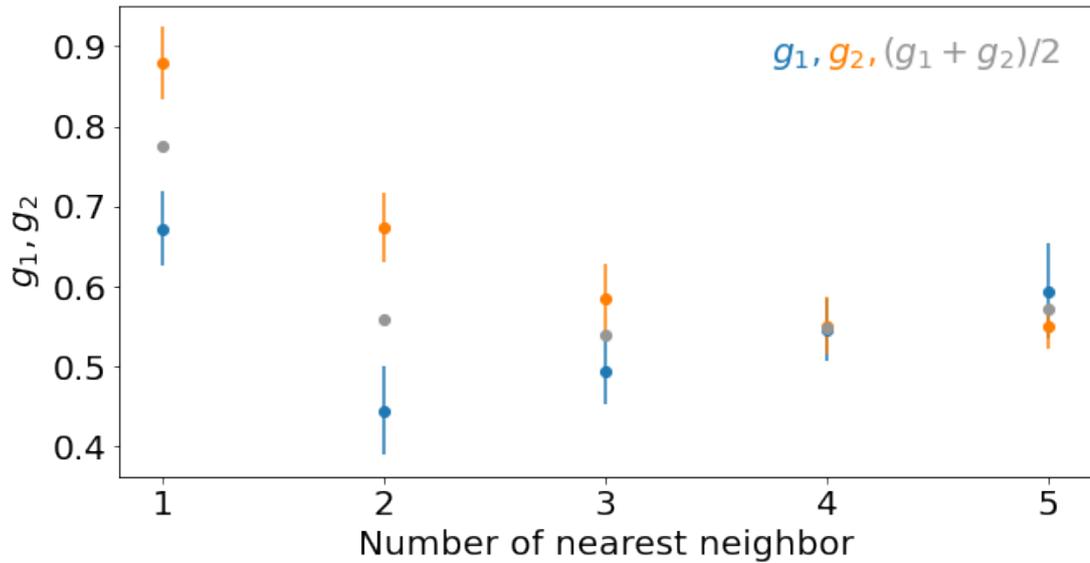


Рисунок 3.6 — Параметры качества g_1 и g_2 для алгоритма определения поверхностной плотности, для различных номеров ближайшего соседа, до которого определялось расстояние для расчета поверхностной плотности.

параметров равен $eps = [0.5, 1, 2]$ Мpc и $minPts = [2, 5, 10]$. После нескольких итераций мы пришли к оптимальным значениям для наших 10 наборов модельных данных: $eps = 0.85$ Мpc и $minPts = 5$.

Статистические параметры выборки групп галактик, полученные с помощью алгоритма поиска групп для первой и последней итераций, показаны на рисунке 3.7. Каждая отдельная точка на графике показывает оценку статистических параметров для каждой из 10 выборок каталога МІСЕСАТ. Цветовая шкала показывает среднее значение параметров качества. Кружками обозначены значения статистических параметров, полученные на первой итерации, а треугольниками - на последней. На рисунках четко видно улучшение параметров качества выборки от первой итерации к последней.

Очевидно, что статистические параметры для набора групп галактик, полученного с помощью алгоритма машинного обучения OPTICS, превосходят параметры наборов групп, полученных с помощью алгоритма определения поверхностной плотности и диаграмм Вороного. Кроме того, алгоритм машинного обучения OPTICS значительно превосходит алгоритмы определения поверхностной плотности и диаграмм Вороного в производительности и времени исполнения программы: алгоритм определения поверхностной плотности тратит на вычисления ~ 1 час, алгоритм диаграмм Вороного ~ 2 минуты, алгоритм OPTICS менее 30 секунд.

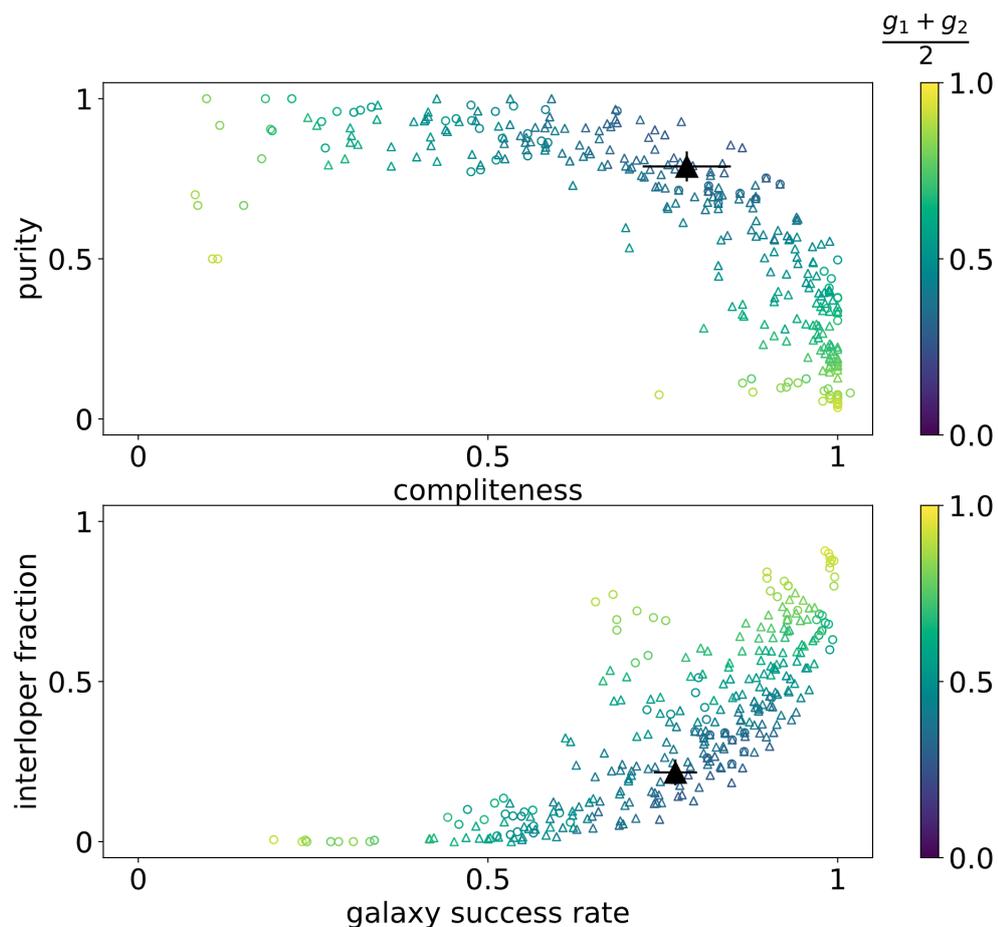


Рисунок 3.7 — Статистические параметры выборки групп галактик, полученные с помощью алгоритма OPTICS. На рисунке показано распределение между полнотой и чистотой выборок группы на *верхней панели*, а также распределение между показателем успешности галактик и долей галактик-нарушителей (*нижняя панель*) для первой и последней итераций выборки параметров. Каждая отдельная точка на графике показывает оценку статистических параметров для каждой из 10 выборок. Цветовая шкала показывает среднее значение параметров качества. Кружками обозначены значения статистических параметров, полученные в первом итерационном наборе, а треугольниками - в последнем. Черные треугольники показывают статистические параметры для наилучшего набора $eps = 0.85$ Мpc и $minPts = 5$ с ошибками 1σ , оцененными по 10 модельным выборкам.

Наконец, мы оцениваем статистические параметры как функцию красного смещения. Результаты показаны на рисунке 3.8. Как и ожидалось, наиболее полные выборки параметров были получены для более близких красных смеще-

ний. По мере увеличения красного смещения полнота и процент успешно определенных скоплений галактик уменьшаются, а ошибки в определении статистических параметров увеличиваются. При $z = 0.6$ алгоритм определяет только самые плотные кластеры. Этот эффект наблюдается не только для макетных каталогов, но, как показано на рисунке 3.9, также для данных наблюдений.

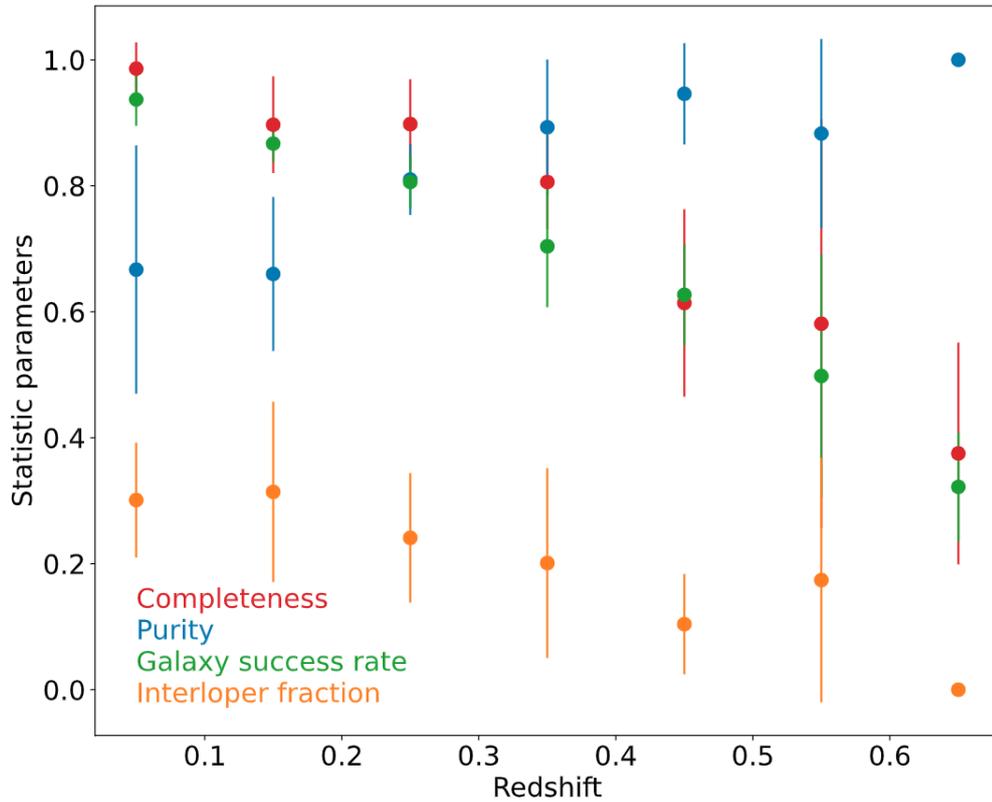


Рисунок 3.8 — Показаны статистические параметры в зависимости от красного смещения. Цвет линии каждого параметра соответствует цветовой подписи на рисунке. Столбики ошибок показывают стандартное отклонение для 10 выборок каталога MICECAT.

3.3 Каталог групп галактик

Мы обнаружили 160 скоплений галактик в поле HS 47.5-22. Распределение красного смещения обнаруженных кластеров показано на рисунке 3.9. Большинство скоплений было обнаружено до красного смещения $z = 0.6$. Это связано с тем, что каталог ограничен по звездной величине, и поэтому количество га-

ластик после $z = 0.6$ быстро уменьшается. Распределение богатства кластеров показано на рисунке 3.10. Большинство из них, как и ожидалось, небольшие группы, в то время как большие группы довольно редки.

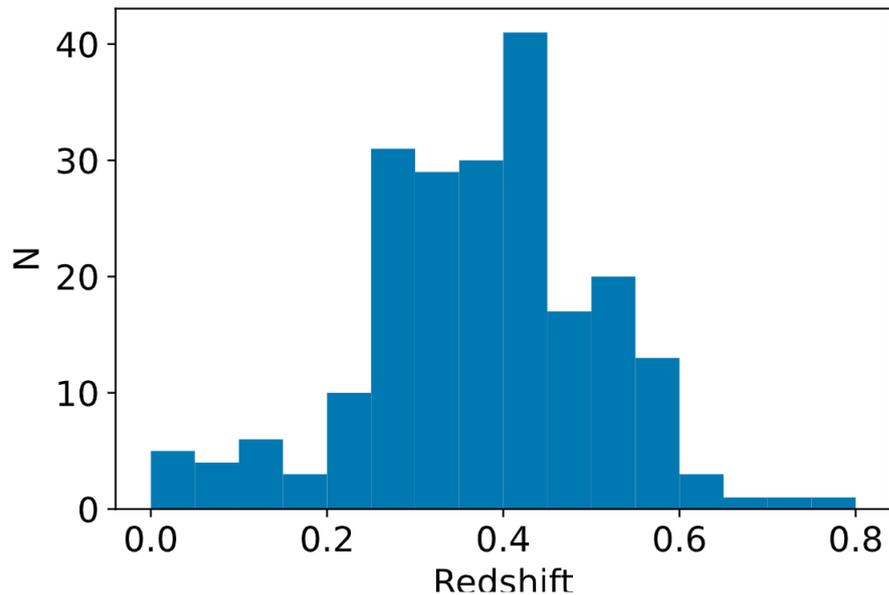


Рисунок 3.9 — Распределение групп галактик по красному смещению в полученном каталоге

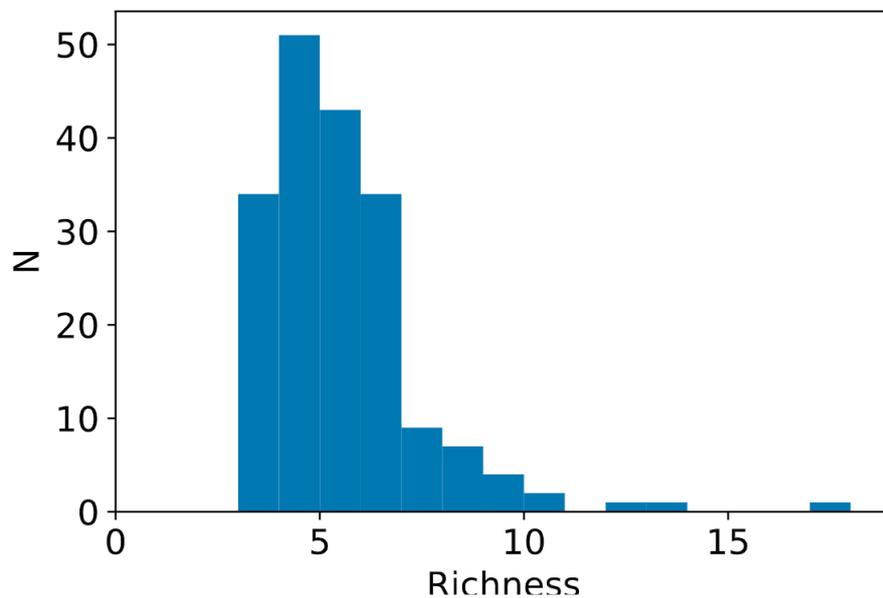


Рисунок 3.10 — Распределение богатства групп галактик в полученном каталоге

В поле HS 47.5-22 на достаточном расстоянии от его границ в предыдущих работах других авторов [160—167] было детектировано 35 скоплений галактик.

Мы сопоставили 24 уже известных скопления галактик обнаруженным в этой работе. При этом в нашей работе [168] мы не нашли только два известных кластера в этой области, это можно объяснить разным порогом звездной величины для отбора галактик в выборку: для первой работы $R_{AB} \leq 23.0^m$, для финальной - $R_{AB} \leq 22.5^m$.

Примеры четырех выделенных групп с различными красными смещениями и их галактик-членов показаны на рисунке 3.11. Все поля имеют одинаковую площадь ($15' \times 15'$). Для группы PDCS 40 на $z = 0.205$ [160], которая показана на *верхней левой панели*, было замечено, что существует довольно близкая группа WHL J095323.9+475842 [169], для которой не указана ее связь с группой PDCS 40. Обе группы имеют довольно близкие координаты центра ($\Delta_{RA} = 2.7^s$; $\Delta_{DEC} = 11.5^s$), а также сходные спектральные красные смещения $\delta z = 0.0002$. Работа Холдена дает общее число наблюдаемых галактик - 9 [164], в работе Вена указано 14 галактик в группе [162], в полученном новом каталоге было определено 13 членов группы.

Описание каталога групп галактик, составленного по данным из Главы 1, представлено в таблицах 4, 5. Таблица 4 - это список всех групп и их свойств, таблица 5 - это список всех галактик, которые были определены как члены групп. Обе таблицы содержат следующую информацию о каталогах в столбцах: (1) - имя параметра, (2) - единица измерения параметра, (3) - описание параметра. Галактики-члены групп связаны со своей группой с помощью уникального идентификатора группы. Идентификаторы галактик в таблице 5 также являются идентификаторами галактик из таблицы 3. В таблице 4 параметр z_fl отвечает за то, как было определено красное смещение скопления: флаг красного смещения: 0, если красное смещение кластера определяется как красное смещение ближайшей галактики к центру со спектральным красным смещением; 1, если красное смещение кластера определяется как красное смещение ближайшей самой яркой галактики (ярче, чем третья по яркости галактика в кластере) к центру с фотометрическим красным смещением; 2, если красное смещение кластера определяется как среднее значение фотометрических красных смещений галактик в кластере.

Богатство группы R определяется количеством галактик в определенной алгоритмом группе. Координаты (Ra, Dec) центра группы были определены с использованием робастной средней оценки координат всех галактик-членов

Таблица 4 — Описание колонок таблицы каталога групп галактик

Имя столбца	Ед. изм.	Описание
GrpID	-	Уникальный идентификатор группы галактик
R	-	Богатство группы
RA	deg.	RA, J2000
DEC	deg.	DEC, J2000
z	-	Фотометрическое красное смещение группы
z_fl	-	Флаг определения красного смещения

Таблица 5 — Описание колонок таблицы каталога галактик-членов группы

Имя столбца	Ед. изм.	Описание
GrpID	-	Уникальный идентификатор группы галактик
GalID	-	Уникальный идентификатор галактики
RA	deg.	RA, J2000
DEC	deg.	DEC, J2000
z_ph	-	Фотометрическое красное смещение галактики
z_sp	-	Спектральное красное смещение галактики (из открытых данных или определено на БТА)

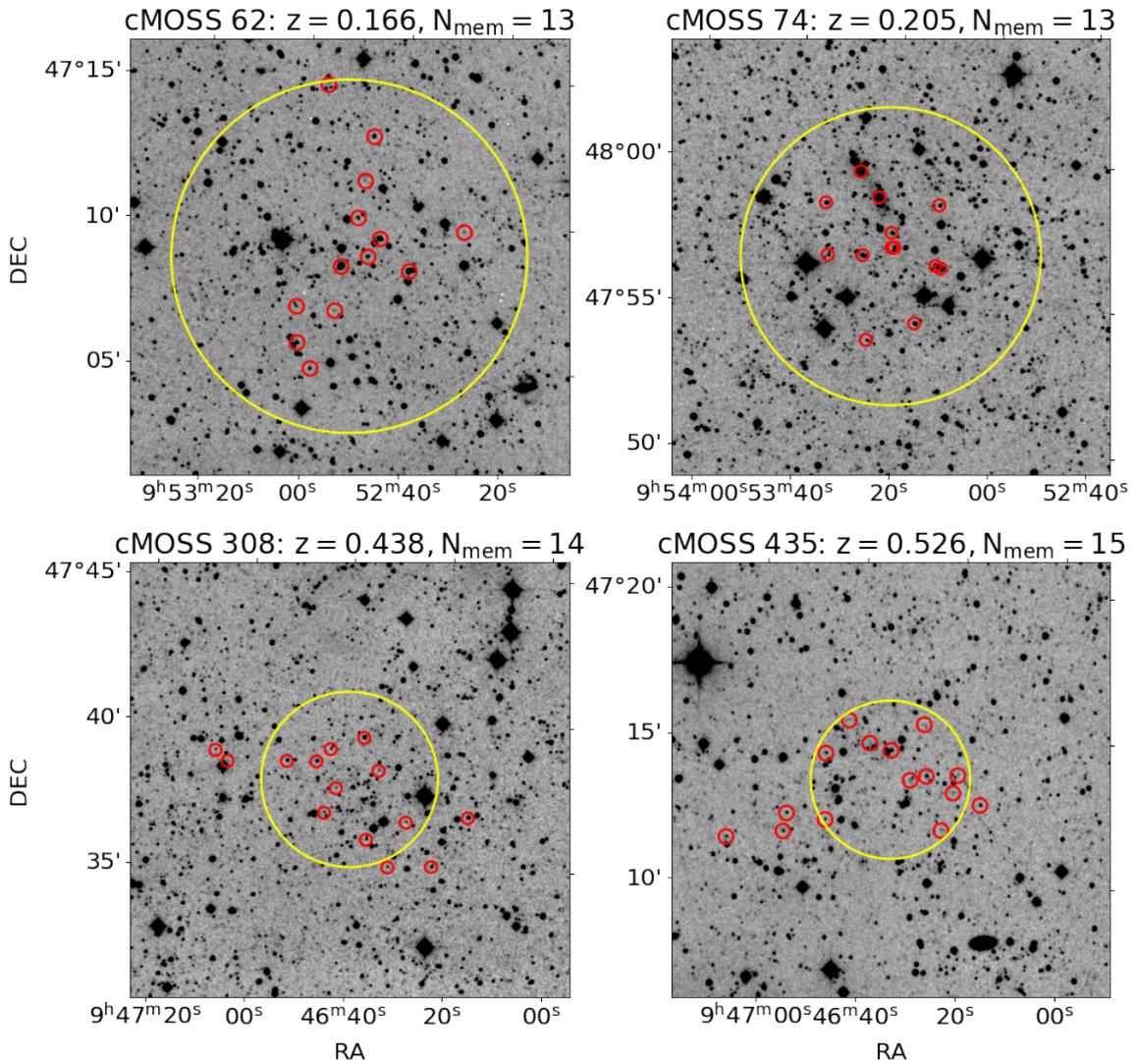


Рисунок 3.11 — Примеры четырех обнаруженных групп с различными красными смещениями и галактики-члены групп на глубоком изображении ($\sim 25^m$), полученные из суммарных изображений в фильтрах r , i и g SDSS. Все поля имеют площадь $15' \times 15'$. Желтый круг на изображении показывает радиус 1 Мпк от центра группы. Маленькие красные круги показывают галактики-члены группы, определенные алгоритмом

группы. Красное смещение скопления определялось красным смещением галактики, ближайшей к центру. Если таких галактик было несколько, то приоритет отдавался сначала галактике, для которой известно спектральное красное смещение, а затем более яркой.

Полный каталог опубликован онлайн и доступен по ссылке <https://github.com/ale-gro/cMOSS>.

Кроме того, карты контраста плотности для поля HS 47.5 - 22 для всего диапазона срезов по красному смещению до $z \sim 0.8$, полученные с помощью

алгоритмов диаграмм Вороного и определения поверхностной плотности, доступны по ссылке <https://github.com/ale-gro/densitymaps>.

3.4 Выводы и результаты Главы 3

В главе представлена реализация трех методов анализа крупномасштабного распределения галактик: диаграмм Вороного, алгоритма определения поверхностной плотности и алгоритма машинного обучения OPTICS. В разделе 3.2 обсуждается необходимость разбиения светового конуса на тонкие слои по красному смещению из-за конечной точности определения фотометрических красных смещений. Описан математический формализм оценки статистических параметров работы алгоритмов. Приведено описание данных модельных выборок галактик из симуляции светового конуса MICECAT для тестирования работы алгоритмов. Показаны результаты сравнения работы всех трех методов анализа крупномасштабного распределения галактик. Описан каталог групп галактик поля HS 47.5-22, состоящий из 160 групп различного богатства, и карты контраста плотности, содержащие 250 значимых крупномасштабных сгущений плотности.

Глава 4. Эволюция физических свойств галактик в зависимости от плотности окружения и красного смещения

Приведены полученные результаты оценки физических параметров галактик (таких как масса, светимость, темп звездообразования и т.д.), а также оценки фотометрических красных смещений галактик, методами, описанными в главе 1, а также выводы влияния окружения на темпы звездообразования в галактиках на разных космологических расстояниях.

4.1 Сравнение плотности окружающей среды, полученной с помощью OPTICS и диаграмм Вороного

Несмотря на то, что алгоритм OPTICS обладает лучшими статистическими оценками при детектировании групп и скоплений галактик, используемая оценка плотности довольно необычна, поэтому следует отдельно обсудить возможности ее использования для анализа зависимостей физических свойств галактик от окружающей среды и сравнить с более привычной оценкой плотности. Для этой цели была использована оценка плотности с использованием диаграмм Вороного из [170].

В методе с использованием диаграмм Вороного плотность имеет размерность Mpc^{-2} . В алгоритме OPTICS аналогом плотности можно рассматривать расстояние достижимости, которое выражается в Mpc . Таким образом, необходимо привести оба параметра к одним и тем же единицам измерения, чтобы иметь возможность сравнить их.

Величина, обратная площади ячейки Вороного, представляет собой числовую плотность, соответствующую каждой галактике - вершине ячейки. Контраст плотности определяется формулой 3.1, а средняя плотность слоя - 3.2. Краевые точки, ячейки Вороного для которых уходят в бесконечность, не учитываются при расчете средней плотности. Чтобы получить аналог поверхностной плотности для OPTICS, можно предположить, что поверхностная плотность $\propto (\text{reachability} - \text{distance})^{-2}$.

Для того чтобы использовать оценки плотности из алгоритма OPTICS, необходимо, чтобы они соответствовали оценкам плотности, полученным с использованием традиционных методов анализа плотности распределения галактик. В работе [170] сравнены оценки плотности окружающей среды, полученные с помощью алгоритма с адаптивной апертурой и тессерациями Вороного. Для трех порядков плотности оба алгоритма показывают аналогичный результат для большого количества объектов, близкий к прямой линии 1:1. Таким образом, ожидается аналогичное поведение для оценки плотности, которая может быть использована для анализа физических зависимостей от окружающей среды.

На рисунке 4.1 показано распределение отношения плотности окружающей среды, определенного для каждой галактики с помощью алгоритма OPTICS и диаграмм Вороного для выборки из 15,807 галактик. Это число галактик немного меньше общего числа галактик в выборке, поскольку внешние ячейки Вороного не закрыты, и оценка площади ячеек и плотности для этих галактик не была получена.

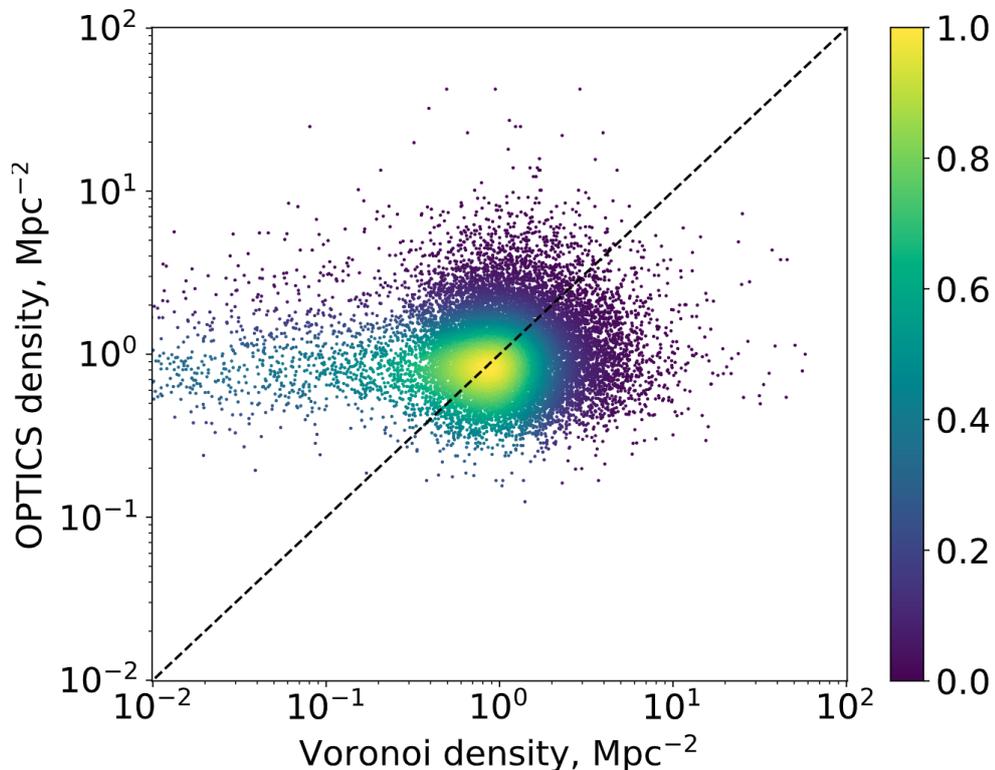


Рисунок 4.1 — Сравнение поверхностной плотности окружающей среды для каждой галактики, полученной с использованием алгоритмов Вороного и OPTICS. Цвет показывает плотность вероятности для каждой галактики.

На рисунке показано, что распределение оценки контрастности плотности не имеет четко определенной формы, вытянутой вдоль линии 1:1, и является довольно случайным. Средняя разница между двумя значениями плотности оценивается как $\Delta = 1.3 \pm 2.0 \text{ Mpc}^{-2}$, что весьма существенно для анализа крупномасштабного распределения плотности. Таким образом, результаты, полученные с использованием OPTICS, имеют лучшие статистические параметры для обнаружения кластеров, но аналог поверхностной плотности для этого алгоритма не может быть использован для анализа зависимостей физических свойств от плотности окружающей среды. Поэтому для анализа эволюции галактик с плотностью окружающей среды использована оценки плотности, полученные с помощью диаграмм Вороного.

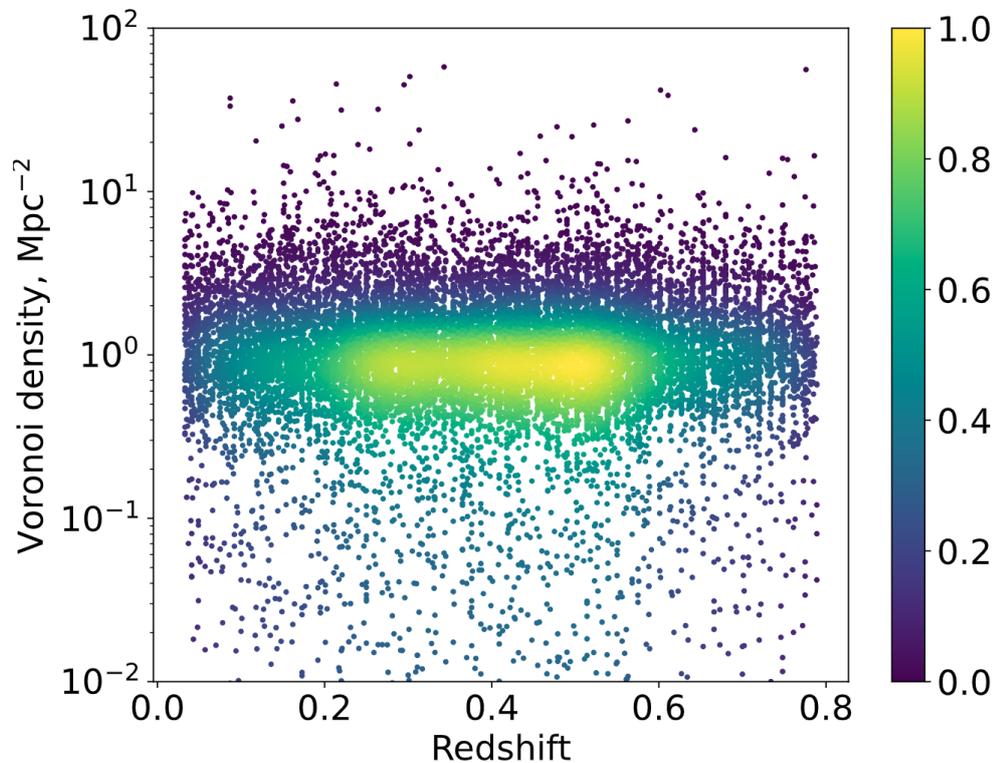


Рисунок 4.2 — Контраст плотности, полученный методом диаграмм Вороного для 15,807 галактик из фотометрического обзора gMOSS в диапазоне красного смещения от 0 до 0.8. Цвет показывает плотность вероятности для каждой галактики. Во всем диапазоне красного смещения основная часть галактик расположена в областях со средней плотностью среды в слое.

На рисунке 4.2 показан полный диапазон полученного контраста плотности с помощью диаграмм Вороного для окружения галактик из выборки в зависимости от красного смещения. Видно, что во всем диапазоне красного сме-

щения большинство галактик расположено в областях со средней плотностью окружающей среды в слое.

4.2 Цвета галактик и типы шаблонов спектрального распределения энергии

Для дальнейшего анализа зависимостей физических свойств галактик от плотности окружающей среды и красного смещения были использованы свойства галактик полученные в Разделе 2.1. Для разделения галактик на красную и синюю популяции было использовано уравнение 2.2.

В работах, посвященных анализу долей разных популяций галактик в зависимости от плотности окружающей среды, было показано, что от ближней Вселенной [171] и до $z = 1.0$ [42] существует сильная зависимость доли красных галактик от плотности окружающей среды. Красные галактики, как правило, находятся в более плотных областях крупномасштабного распределения галактик, и их процент намного меньше, чем галактик голубого облака. На рисунке 4.3 показаны корреляции доли красных галактик для семи ячеек красного смещения с контрастом плотности. Неопределенности вычисляются путем ресэмплинга начальной выборки методом бутстрэпа.

Рисунок 4.3 ясно показывает, что галактик красной последовательности предпочитают находиться в более плотных средах вплоть до красного смещения $z \sim 0.8$, при этом их общий процент систематически уменьшается с увеличением красного смещения. Этот рисунок ясно показывает сильное увеличение доли красных галактик до $z < 0.35$ в плотных средах. Сглаживание зависимости доли галактик красной последовательности от плотности окружения на более высоких красных смещениях, вероятно, частично связано с уменьшением динамического диапазона плотностей окружающей среды из-за того, что исследуемая выборка ограничена пороговой звездной величиной $R_{AB} \leq 22.5^m$.

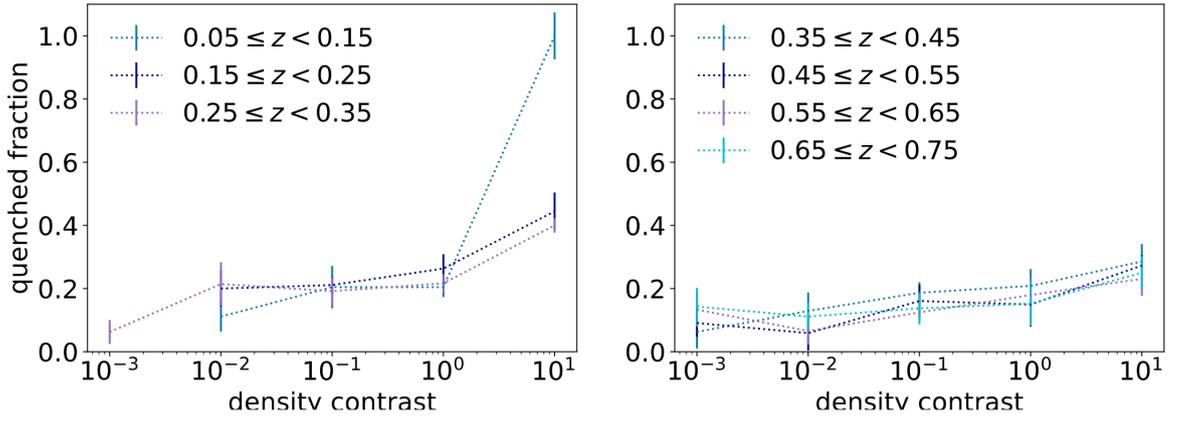


Рисунок 4.3 — Доля галактик красной последовательности в зависимости от плотности окружающей среды показана для семи диапазонов красного смещения. Неопределенности вычисляются путем ресэмплинга начальной выборки с помощью бутстрэпа.

4.3 Зависимость плотности звездообразования от плотности окружения

На рисунке 4.4 показаны медианная SFR (*левая панель*) и шкала времени звездообразования ($\tau_{SF} = M_*/SF$, *правая панель*) в зависимости от плотности окружающей среды для трех диапазонов красного смещения. SFR и неопределенности для каждой галактики были оценены с использованием кода SIGALE. SFR увеличиваются в 10 раз с диапазона красного смещения $0.05 \leq z \leq 0.25$ до $0.5 \leq z \leq 0.75$. SFR уменьшается с увеличением плотности окружающей среды, но не так значительно, как в [42].

Шкала времени звездообразования увеличивается в несколько раз с $z = 0.05$ до 0.75 в менее плотных средах и на порядок в более плотных средах. Зависимость от окружающей среды более очевидна при низком красном смещении (до $z = 0.5$) и более сглажена для последнего бина красного смещения.

Для анализа плотности скорости звездообразования мы будем использовать процентиля вместо абсолютных значений. Это позволит нам эффективно нормализовать все диапазоны плотностей окружающей среды и зависимость средней плотности окружающей среды от красного смещения. На рисунке 4.5 показано соответствие между процентилем плотности и абсолютной поверхностной плотностью.

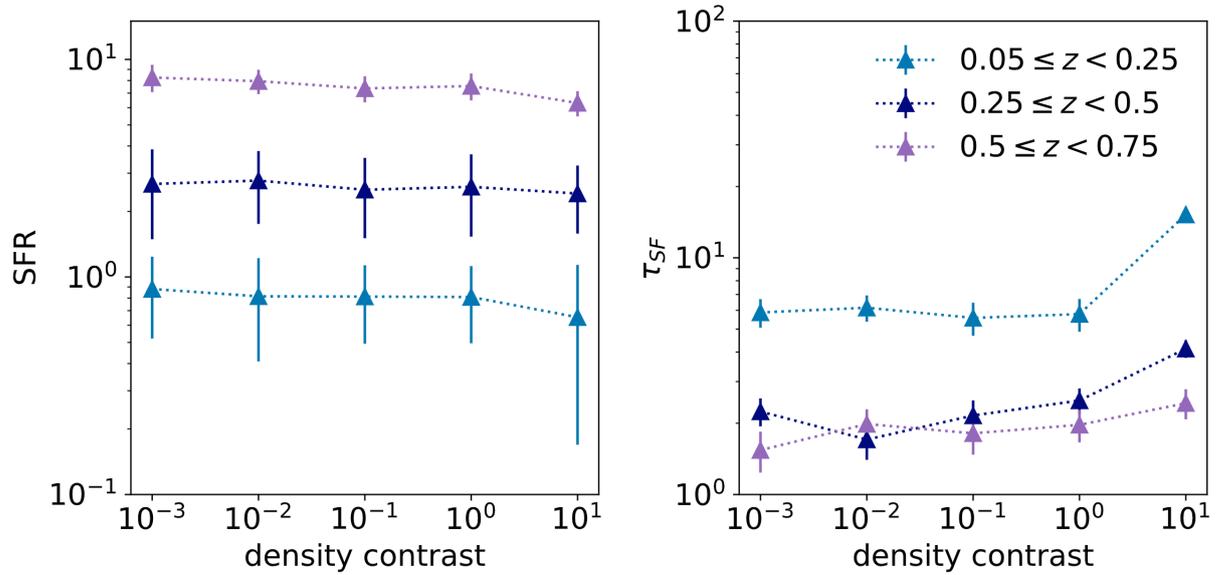


Рисунок 4.4 — Медианная SFR и характеристическая шкала времени звездообразования как функция плотности окружающей среды для трех диапазонов красного смещения. Бары ошибок показывают стандартное отклонение для оценок параметров в каждом диапазоне красного смещения; если бар ошибок не отображен, то его значение меньше символа.

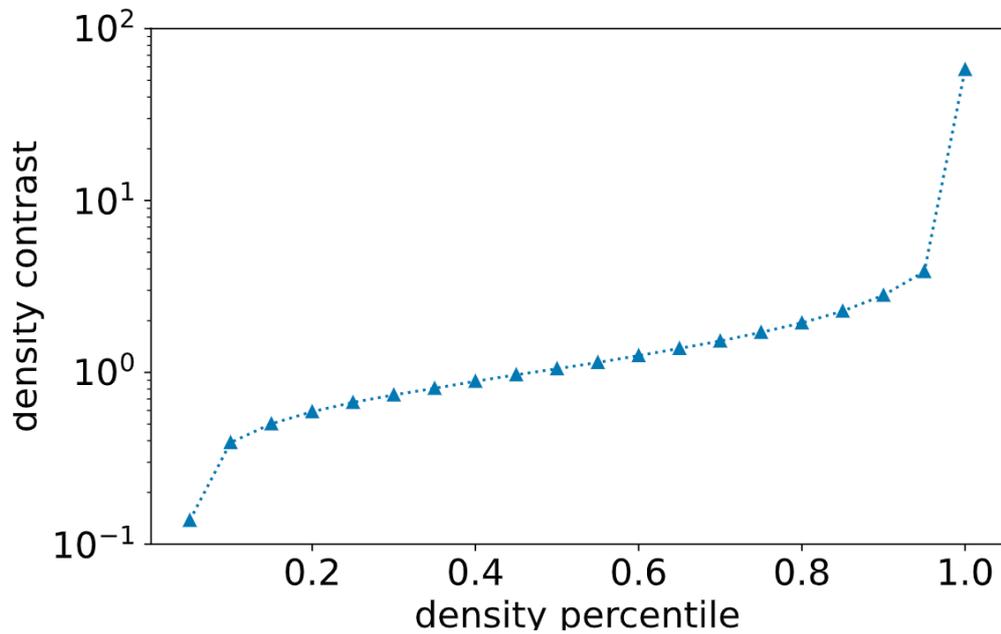


Рисунок 4.5 — Соответствие между процентиями плотности (используемыми на рисунке 4.6) и оценкой контраста плотности окружения для полной выборки галактик.

Неполнота исследуемой выборки галактик была оценена в разделе 2.2.5. На рисунке 4.6 показаны относительные доли SFRD для двух диапазонов крас-

ного смещения ($z \leq 0.25$, $0.25 < z \leq 0.5$) в разных перцентилях плотности. Каждая ячейка перцентиля плотности включает равное количество галактик, поэтому на этом графике показано нормализованное изменение красного смещения числа галактик во всем диапазоне плотностей окружающей среды. Основной вклад SFRD возникает в средах с более низкой плотностью в каждом диапазоне красного смещения.

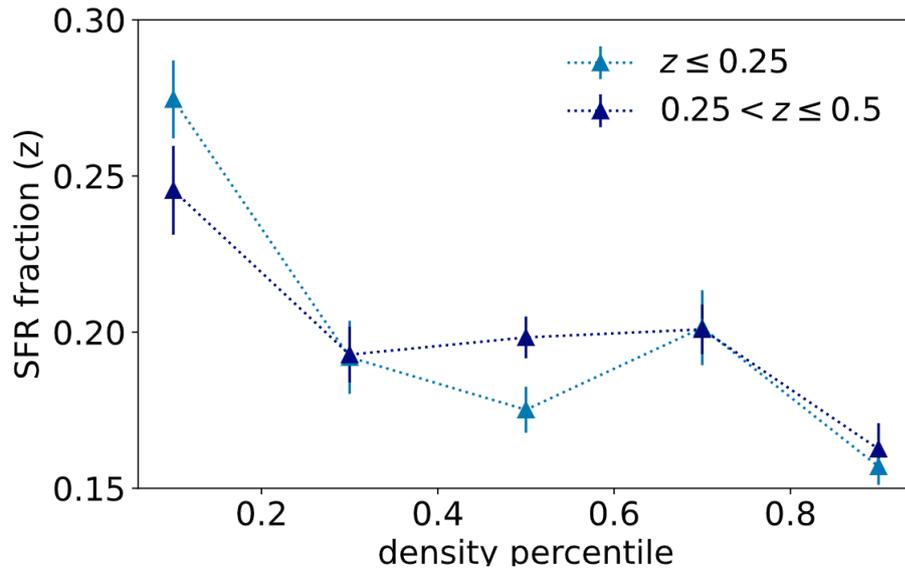


Рисунок 4.6 — Процент плотности скорости звездообразования в зависимости от перцентилей плотности окружающей среды для двух диапазонов красного смещения: $z \leq 0.25$ и $0.25 < z \leq 0.5$. Неопределенности вычисляются путем ресэмплинга начальной выборки с помощью бутстрэпа.

Увеличение относительной доли SFRD в областях с наименьшей плотностью окружающей среды уже обсуждалось в работах других авторов. В работе [172] предполагается, что это связано с двумя факторами: 1. галактики в плотных средах эволюционируют быстрее 2. прекращение подачи звездообразующего газа в плотных средах.

4.4 Выводы и результаты главы 4

В главе произведен анализ эволюции физических свойств галактик в зависимости от плотности окружения и красного смещения, обсуждены зависи-

мости цвета галактик и типов шаблонов спектрального распределения энергии. Полученные результаты показывают, что галактики ранних типов предпочитают находиться в более плотных областях вплоть до $z \sim 0.8$.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Получены однородные наблюдательные данные для поля HS 47.5-22 площадью более $2.38 \square^\circ$;
2. Составлена полная по потоку выборка из более 19,000 галактик ярче $R_{AB} = 22.5^m$ на площадке более $2.38 \square^\circ$, которая в дальнейшем была использована для анализа крупномасштабного распределения галактик и определения физических свойств галактик в выборке;
3. Получены физические характеристики галактик поля HS 47.5-22 площадью более $2.38 \square^\circ$. Получены оценки плотности скорости звездообразования $SFRD = -1.907 \pm 0.2 M_\odot \text{yr}^{-1} \text{pc}^{-3}$ 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 $0.05 \leq z \leq 0.15$, которые согласуются с результатами известных космологических обзоров, и показывают возможности телескопов метрового класса для изучения эволюции галактик;
4. Показано превосходство метода машинного обучения OPTICS над традиционными методами анализа крупномасштабного распределения галактик (тесселяциями Вороного и алгоритмом определения поверхностной плотности) полноте и чистоте получаемой выборки групп галактик;
5. Получен каталог групп галактик, содержащий данные о ~ 160 группах до красного смещения $z = 0.8$ на площадке более $2.38 \square^\circ$ с количеством галактик членов более трех, также обнаружено более 250 значимых крупномасштабных скучиваний плотности ;
6. 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.

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)].
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. — с. 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).
55. Mass and environment as drivers of galaxy evolution in SDSS and cosmos and the origin of the Schechter function / Y. J. Peng [и др.] // *Astrophysical Journal*. — 2010. — т. 721, № 1. — с. 193—221. — DOI: [10.1088/0004-637X/721/1/193](https://doi.org/10.1088/0004-637X/721/1/193).
56. A catalogue of faint, UV-excess objects. / B. J. Boyle [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1990. — март. — т. 243. — с. 1—56. — DOI: [10.1093/mnras/243.1.1](https://doi.org/10.1093/mnras/243.1.1).
57. *Drinkwater M. J.* Objective prism measurements of quasar redshifts. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1988. — март. — т. 231. — с. 391—396. — DOI: [10.1093/mnras/231.2.391](https://doi.org/10.1093/mnras/231.2.391).
58. *Димитров Г., Бэкер Д.* Телескопы и принадлежности к ним. — 1947.
59. *Baum W. A.* Photoelectric Magnitudes and Red-Shifts // *Problems of Extra-Galactic Research*. т. 15 / под ред. G. C. McVittie. — 01.1962. — с. 390.
60. *Loh E. D., Spillar E. J.* Photometric Redshifts of Galaxies // *ApJ*. — 1986. — апр. — т. 303. — с. 154. — DOI: [10.1086/164062](https://doi.org/10.1086/164062).
61. *Koo D. C.* Multicolor Photometry of Field Galaxies to B approximately equal to 24 // *ApJ*. — 1986. — дек. — т. 311. — с. 651. — DOI: [10.1086/164805](https://doi.org/10.1086/164805).

62. *Hickson P., Gibson B. K., Callaghan K. A. S.* Multinarrowband imaging: a new technique for multi-object spectrophotometry. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1994. — апр. — т. 267. — с. 911—917. — DOI: [10.1093/mnras/267.4.911](https://doi.org/10.1093/mnras/267.4.911).
63. *Chen J. .-S.* Wide Field Imaging and Photometry with 2k X 2k CCD // *Astronomy from Wide-Field Imaging*. т. 161 / под ред. Н. Т. MacGillivray. — 01.1994. — с. 17.
64. Slicing Through Multicolor Space: Galaxy Redshifts from Broadband Photometry / A. J. Connolly [и др.] // *Astronomical Journal*. — 1995. — дек. — т. 110. — с. 2655. — DOI: [10.1086/117720](https://doi.org/10.1086/117720). — arXiv: [astro-ph/9508100](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9508100) [[astro-ph](#)].
65. *Lanzetta K. M., Yahil A., Fernández-Soto A.* Star-forming galaxies at very high redshifts // *Nature*. — 1996. — июнь. — т. 381, № 6585. — с. 759—763. — DOI: [10.1038/381759a0](https://doi.org/10.1038/381759a0). — arXiv: [astro-ph/9606171](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9606171) [[astro-ph](#)].
66. *Fernández-Soto A., Lanzetta K. M., Yahil A.* A New Catalog of Photometric Redshifts in the Hubble Deep Field // *ApJ*. — 1999. — март. — т. 513, № 1. — с. 34—50. — DOI: [10.1086/306847](https://doi.org/10.1086/306847). — arXiv: [astro-ph/9809126](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9809126) [[astro-ph](#)].
67. A catalogue of the Chandra Deep Field South with multi-colour classification and photometric redshifts from COMBO-17 / C. Wolf [и др.] // *Astronomy and Astrophysics*. — 2004. — т. 421, № 3. — с. 913—936. — DOI: [10.1051/0004-6361:20040525](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20040525).
68. The alhambra survey: A large area multimediu-band optical and near-infrared photometric survey / M. Moles [и др.] // *Astronomical Journal*. — 2008. — т. 136, № 3. — с. 1325—1339. — DOI: [10.1088/0004-6256/136/3/1325](https://doi.org/10.1088/0004-6256/136/3/1325).
69. Ly α Emitters at Redshift 5.7 in the COSMOS Field / T. Murayama [и др.] // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2007. — сент. — т. 172. — с. 523—544. — DOI: [10.1086/516597](https://doi.org/10.1086/516597).
70. Measuring Baryon Acoustic Oscillations Along the Line of Sight with Photometric Redshifts: The PAU Survey / N. Benítez [и др.] // *ApJ*. — 2009. — янв. — т. 691, № 1. — с. 241—260. — DOI: [10.1088/0004-637X/691/1/241](https://doi.org/10.1088/0004-637X/691/1/241). — arXiv: [0807.0535](https://arxiv.org/abs/0807.0535) [[astro-ph](#)].

71. J-PAS: The Javalambre-Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey / N. Benitez [и др.] // arXiv e-prints. — 2014. — март. — arXiv:1403.5237. — arXiv: [1403.5237](https://arxiv.org/abs/1403.5237) [[astro-ph.CO](#)].
72. The miniJPAS survey: Identification and characterization of galaxy populations with the J-PAS photometric system / R. M. González Delgado [и др.] // arXiv e-prints. — 2021. — февр. — arXiv:2102.13121. — arXiv: [2102.13121](https://arxiv.org/abs/2102.13121) [[astro-ph.GA](#)].
73. The 2dF Galaxy Redshift Survey: Final Data Release / M. Colless [и др.] // arXiv e-prints. — 2003. — июнь. — [astro-ph/0306581](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0306581). — arXiv: [astro-ph/0306581](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0306581) [[astro-ph](#)].
74. *Molthagen K., Wendker H. J., Briel U. G.* Multiwavelength observations of the field HS 47.5/22 in Ursa Major. I. The X-ray catalogue of a medium deep ROSAT survey // *Astronomy and Astrophysics, Supplement*. — 1997. — дек. — т. 126. — с. 509—517. — DOI: [10.1051/aas:1997391](https://doi.org/10.1051/aas:1997391).
75. One-meter Schmidt telescope of the Byurakan Astrophysical Observatory: New capabilities / S. N. Dodonov [и др.] // *Astrophysical Bulletin*. — 2017. — окт. — т. 72. — с. 473—479. — DOI: [10.1134/S1990341317040113](https://doi.org/10.1134/S1990341317040113).
76. SRG X-ray orbital observatory. Its telescopes and first scientific results / R. Sunyaev [и др.] // *A&A*. — 2021. — дек. — т. 656. — A132. — DOI: [10.1051/0004-6361/202141179](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141179). — arXiv: [2104.13267](https://arxiv.org/abs/2104.13267) [[astro-ph.HE](#)].
77. *Lockman F. J., Jahoda K., McCammon D.* The Structure of Galactic H i in Directions of Low Total Column Density // *ApJ*. — 1986. — март. — т. 302. — с. 432. — DOI: [10.1086/164002](https://doi.org/10.1086/164002).
78. *Afanasiev V. L., Moiseev A. V.* Scorpio on the 6 m Telescope: Current State and Perspectives for Spectroscopy of Galactic and Extragalactic Objects // *Baltic Astronomy*. — 2011. — авг. — т. 20. — с. 363—370. — DOI: [10.1515/astro-2017-0305](https://doi.org/10.1515/astro-2017-0305). — eprint: <https://arxiv.org/pdf/1106.2020.pdf>.
79. *Bertin E., Arnouts S.* SExtractor: Software for source extraction. // *Astronomy and Astrophysics, Supplement*. — 1996. — июнь. — т. 117. — с. 393—404. — DOI: [10.1051/aas:1996164](https://doi.org/10.1051/aas:1996164).

80. Ultradeep Near-Infrared ISAAC Observations of the Hubble Deep Field South: Observations, Reduction, Multicolor Catalog, and Photometric Redshifts / I. Labbé [и др.] // *Astronomical Journal*. — 2003. — март. — т. 125, № 3. — с. 1107—1123. — DOI: [10.1086/346140](https://doi.org/10.1086/346140). — arXiv: [astro-ph/0212236](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0212236) [[astro-ph](#)].
81. The Multiwavelength Survey by Yale-Chile (MUSYC): Survey Design and Deep Public UBVRIz' Images and Catalogs of the Extended Hubble Deep Field-South / E. Gawiser [и др.] // *ApJ Supplement*. — 2006. — янв. — т. 162, № 1. — с. 1—19. — DOI: [10.1086/497644](https://doi.org/10.1086/497644). — arXiv: [astro-ph/0509202](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0509202) [[astro-ph](#)].
82. The Multiwavelength Survey by Yale-Chile (MUSYC): Deep Medium-band Optical Imaging and High-quality 32-band Photometric Redshifts in the ECDF-S / C. N. Cardamone [и др.] // *ApJ Supplement*. — 2010. — авг. — т. 189, № 2. — с. 270—285. — DOI: [10.1088/0067-0049/189/2/270](https://doi.org/10.1088/0067-0049/189/2/270). — arXiv: [1008.2974](https://arxiv.org/abs/1008.2974) [[astro-ph.CO](#)].
83. The USNO-B Catalog / D. G. Monet [и др.] // *Astronomical Journal*. — 2003. — февр. — т. 125, № 2. — с. 984—993. — DOI: [10.1086/345888](https://doi.org/10.1086/345888). — arXiv: [astro-ph/0210694](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0210694) [[astro-ph](#)].
84. The Hubble Deep Field: Observations, Data Reduction, and Galaxy Photometry / R. E. Williams [и др.] // *Astronomical Journal*. — 1996. — окт. — т. 112. — с. 1335. — DOI: [10.1086/118105](https://doi.org/10.1086/118105). — arXiv: [astro-ph/9607174](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9607174) [[astro-ph](#)].
85. *Gawiser E., MUSYC Collaboration*. The MUSYC Census of Protogalaxies at $z=3$ // *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. т. 207. — 12.2005. — с. 157.01. — (American Astronomical Society Meeting Abstracts).
86. *Szalay A. S., Connolly A. J., Szokoly G. P.* Simultaneous Multicolor Detection of Faint Galaxies in the Hubble Deep Field // *Astronomical Journal*. — 1999. — янв. — т. 117, № 1. — с. 68—74. — DOI: [10.1086/300689](https://doi.org/10.1086/300689). — arXiv: [astro-ph/9811086](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9811086) [[astro-ph](#)].
87. The First Release COSMOS Optical and Near-IR Data and Catalog / P. Capak [и др.] // *ApJ Supplement*. — 2007. — сент. — т. 172, № 1. — с. 99—116. — DOI: [10.1086/519081](https://doi.org/10.1086/519081). — arXiv: [0704.2430](https://arxiv.org/abs/0704.2430) [[astro-ph](#)].

88. A Public, K-Selected, Optical-to-Near-Infrared Catalog of the Extended Chandra Deep Field South (ECDFS) from the Multiwavelength Survey by Yale-Chile (MUSYC) / E. N. Taylor [и др.] // *ApJ Supplement*. — 2009. — авг. — т. 183, № 2. — с. 295—319. — DOI: [10.1088/0067-0049/183/2/295](https://doi.org/10.1088/0067-0049/183/2/295). — arXiv: [0903.3051](https://arxiv.org/abs/0903.3051) [[astro-ph.CO](#)].
89. *Kron R. G.* Photometry of a complete sample of faint galaxies. // *ApJ Supplement*. — 1980. — июнь. — т. 43. — с. 305—325. — DOI: [10.1086/190669](https://doi.org/10.1086/190669).
90. *Dodonov S. N., Chilingaryan I. V.* Library of reference spectral energy distributions of galaxies for the classification and determination of photometric redshifts of objects // *Astrophysical Bulletin*. — 2008. — март. — т. 63, № 1. — с. 1—12. — DOI: [10.1007/s11755-008-1001-y](https://doi.org/10.1007/s11755-008-1001-y).
91. The Zurich Extragalactic Bayesian Redshift Analyzer and its first application: COSMOS / R. Feldmann [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2006. — окт. — т. 372, № 2. — с. 565—577. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2006.10930.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10930.x). — arXiv: [astro-ph/0609044](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0609044) [[astro-ph](#)].
92. The Gaia mission / Gaia Collaboration [и др.] // *A&A*. — 2016. — нояб. — т. 595. — A1. — DOI: [10.1051/0004-6361/201629272](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629272).
93. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties / Gaia Collaboration [и др.] // *A&A*. — 2018. — авг. — т. 616. — A1. — DOI: [10.1051/0004-6361/201833051](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833051).
94. Overview of the DESI Legacy Imaging Surveys / A. Dey [и др.] // *Astronomical Journal*. — 2019. — май. — т. 157, № 5. — с. 168. — DOI: [10.3847/1538-3881/ab089d](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab089d). — arXiv: [1804.08657](https://arxiv.org/abs/1804.08657) [[astro-ph.IM](#)].
95. Galaxy Number Counts from the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data / N. Yasuda [и др.] // *Astronomical Journal*. — 2001. — сент. — т. 122, № 3. — с. 1104—1124. — DOI: [10.1086/322093](https://doi.org/10.1086/322093). — arXiv: [astro-ph/0105545](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0105545) [[astro-ph](#)].
96. A Deep Wide-Field, Optical, and Near-Infrared Catalog of a Large Area around the Hubble Deep Field North / P. Capak [и др.] // *Astronomical Journal*. — 2004. — янв. — т. 127, № 1. — с. 180—198. — DOI: [10.1086/380611](https://doi.org/10.1086/380611). — arXiv: [astro-ph/0312635](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0312635) [[astro-ph](#)].

97. The Subaru Deep Field: The Optical Imaging Data / N. Kashikawa [и др.] // . — 2004. — дек. — т. 56. — с. 1011—1023. — DOI: [10.1093/pasj/56.6.1011](https://doi.org/10.1093/pasj/56.6.1011). — arXiv: [astro-ph/0410005](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0410005) [[astro-ph](#)].
98. ProSpect: generating spectral energy distributions with complex star formation and metallicity histories / A. S. G. Robotham [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2020. — июнь. — т. 495, № 1. — с. 905—931. — DOI: [10.1093/mnras/staa1116](https://doi.org/10.1093/mnras/staa1116). — arXiv: [2002.06980](https://arxiv.org/abs/2002.06980) [[astro-ph.GA](#)].
99. *Chevallard J., Charlot S.* Modelling and interpreting spectral energy distributions of galaxies with BEAGLE // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2016. — окт. — т. 462, № 2. — с. 1415—1443. — DOI: [10.1093/mnras/stw1756](https://doi.org/10.1093/mnras/stw1756). — arXiv: [1603.03037](https://arxiv.org/abs/1603.03037) [[astro-ph.GA](#)].
100. Inferring the star formation histories of massive quiescent galaxies with BAGPIPES: evidence for multiple quenching mechanisms / A. C. Carnall [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2018. — нояб. — т. 480, № 4. — с. 4379—4401. — DOI: [10.1093/mnras/sty2169](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2169). — arXiv: [1712.04452](https://arxiv.org/abs/1712.04452) [[astro-ph.GA](#)].
101. *Burgarella D., Buat V., Iglesias-Páramo J.* Star formation and dust attenuation properties in galaxies from a statistical ultraviolet-to-far-infrared analysis // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2005. — июль. — т. 360, № 4. — с. 1413—1425. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2005.09131.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09131.x). — arXiv: [astro-ph/0504434](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0504434) [[astro-ph](#)].
102. Analysis of galaxy spectral energy distributions from far-UV to far-IR with CIGALE: studying a SINGS test sample / S. Noll [и др.] // A&A. — 2009. — дек. — т. 507, № 3. — с. 1793—1813. — DOI: [10.1051/0004-6361/200912497](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912497). — arXiv: [0909.5439](https://arxiv.org/abs/0909.5439) [[astro-ph.CO](#)].
103. CIGALE: a python Code Investigating GALaxy Emission / M. Boquien [и др.] // A&A. — 2019. — февр. — т. 622. — A103. — DOI: [10.1051/0004-6361/201834156](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834156). — arXiv: [1811.03094](https://arxiv.org/abs/1811.03094) [[astro-ph.GA](#)].
104. Deriving Physical Properties from Broadband Photometry with Prospector: Description of the Model and a Demonstration of its Accuracy Using 129 Galaxies in the Local Universe / J. Leja [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2017. — март. — т. 837, № 2. — с. 170. — DOI: [10.3847/1538-4357/aa5ffe](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa5ffe). — URL: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa5ffe>.

105. bd-j/prospector: prospector v1.0.0 / B. D. Johnson [и др.]. — вер. v1.0.0. — 12.2020. — DOI: [10.5281/zenodo.4586953](https://doi.org/10.5281/zenodo.4586953).
106. *da Cunha E., Charlot S., Elbaz D.* A simple model to interpret the ultraviolet, optical and infrared emission from galaxies // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2008. — авг. — т. 388, № 4. — с. 1595—1617. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.13535.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13535.x). — arXiv: [0806.1020](https://arxiv.org/abs/0806.1020) [[astro-ph](#)].
107. *Han Y., Han Z.* Decoding Spectral Energy Distributions of Dust-obscured Starburst-Active Galactic Nucleus // *ApJ*. — 2012. — апр. — т. 749, № 2. — с. 123. — DOI: [10.1088/0004-637X/749/2/123](https://doi.org/10.1088/0004-637X/749/2/123). — arXiv: [1202.6203](https://arxiv.org/abs/1202.6203) [[astro-ph.CO](#)].
108. *Han Y., Han Z.* BayeSED: A General Approach to Fitting the Spectral Energy Distribution of Galaxies // *ApJ Supplement*. — 2014. — нояб. — т. 215, № 1. — с. 2. — DOI: [10.1088/0067-0049/215/1/2](https://doi.org/10.1088/0067-0049/215/1/2). — arXiv: [1408.6399](https://arxiv.org/abs/1408.6399) [[astro-ph.GA](#)].
109. *Han Y., Han Z.* A Comprehensive Bayesian Discrimination of the Simple Stellar Population Model, Star Formation History, and Dust Attenuation Law in the Spectral Energy Distribution Modeling of Galaxies // *ApJ Supplement*. — 2019. — янв. — т. 240, № 1. — с. 3. — DOI: [10.3847/1538-4365/aaeffa](https://doi.org/10.3847/1538-4365/aaeffa). — arXiv: [1811.04180](https://arxiv.org/abs/1811.04180) [[astro-ph.GA](#)].
110. *Bruzual G., Charlot S.* Stellar population synthesis at the resolution of 2003 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2003. — окт. — т. 344, № 4. — с. 1000—1028. — DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06897.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06897.x). — arXiv: [astro-ph/0309134](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0309134) [[astro-ph](#)].
111. *Chabrier G.* Galactic Stellar and Substellar Initial Mass Function // *PASP*. — 2003. — июль. — т. 115, № 809. — с. 763—795. — DOI: [10.1086/376392](https://doi.org/10.1086/376392). — arXiv: [astro-ph/0304382](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0304382) [[astro-ph](#)].
112. The Dust Content and Opacity of Actively Star-forming Galaxies / D. Calzetti [и др.] // *ApJ*. — 2000. — апр. — т. 533, № 2. — с. 682—695. — DOI: [10.1086/308692](https://doi.org/10.1086/308692). — arXiv: [astro-ph/9911459](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9911459) [[astro-ph](#)].
113. Spot the difference. Impact of different selection criteria on observed properties of passive galaxies in zCOSMOS-20k sample / M. Moresco [и др.]

- др.] // A&A. — 2013. — окт. — т. 558. — A61. — DOI: [10.1051/0004-6361/201321797](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321797). — arXiv: [1305.1308](https://arxiv.org/abs/1305.1308) [astro-ph.CO].
114. *Malmquist K. G.* On some relations in stellar statistics // Meddelanden fran Lunds Astronomiska Observatorium Serie I. — 1922. — март. — т. 100. — с. 1—52.
115. S. J. Lilly [и др.] // ApJL. — 1996. — март. — т. 460. — DOI: [10.1086/309975](https://doi.org/10.1086/309975). — arXiv: [astro-ph/9601050](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9601050) [astro-ph].
116. *Madau P., Pozzetti L., Dickinson M.* The Star Formation History of Field Galaxies // ApJ. — 1998. — май. — т. 498, № 1. — с. 106—116. — DOI: [10.1086/305523](https://doi.org/10.1086/305523). — arXiv: [astro-ph/9708220](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9708220) [astro-ph].
117. *Hopkins A. M., Beacom J. F.* On the Normalization of the Cosmic Star Formation History // ApJ. — 2006. — нояб. — т. 651, № 1. — с. 142—154. — DOI: [10.1086/506610](https://doi.org/10.1086/506610). — arXiv: [astro-ph/0601463](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0601463) [astro-ph].
118. On the evolutionary history of stars and their fossil mass and light / M. A. Fardal [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2007. — авг. — т. 379, № 3. — с. 985—1002. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2007.11522.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.11522.x). — arXiv: [astro-ph/0604534](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0604534) [astro-ph].
119. Galaxy And Mass Assembly: evolution of the H α luminosity function and star formation rate density up to $z < 0.35$ / M. L. P. Gunawardhana [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2013. — авг. — т. 433, № 4. — с. 2764—2789. — DOI: [10.1093/mnras/stt890](https://doi.org/10.1093/mnras/stt890). — arXiv: [1305.5308](https://arxiv.org/abs/1305.5308) [astro-ph.CO].
120. *Madau P., Dickinson M.* Cosmic Star-Formation History // Annual Review of Astron and Astrophys. — 2014. — авг. — т. 52. — с. 415—486. — DOI: [10.1146/annurev-astro-081811-125615](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081811-125615). — arXiv: [1403.0007](https://arxiv.org/abs/1403.0007) [astro-ph.CO].
121. GAMA/G10-COSMOS/3D-HST: the $0 < z < 5$ cosmic star formation history, stellar-mass, and dust-mass densities / S. P. Driver [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2018. — апр. — т. 475, № 3. — с. 2891—2935. — DOI: [10.1093/mnras/stx2728](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2728). — arXiv: [1710.06628](https://arxiv.org/abs/1710.06628) [astro-ph.GA].
122. *Driver S. P., Robotham A. S. G.* Quantifying cosmic variance // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2010. — окт. — т. 407, № 4. — с. 2131—2140. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.17028.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17028.x). — arXiv: [1005.2538](https://arxiv.org/abs/1005.2538) [astro-ph.CO].

123. B. Panter [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2007. — июль. — т. 378, № 4. — с. 1550—1564. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2007.11909.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.11909.x). — arXiv: [astro-ph/0608531](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0608531) [[astro-ph](#)].
124. S. F. Sanchez [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2019. — янв. — т. 482, № 2. — с. 1557—1586. — DOI: [10.1093/mnras/sty2730](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2730). — arXiv: [1807.11528](https://arxiv.org/abs/1807.11528) [[astro-ph.GA](#)].
125. J. Leja [и др.] // ApJ. — 2019. — май. — т. 876, № 1. — с. 3. — DOI: [10.3847/1538-4357/ab133c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab133c). — arXiv: [1811.03637](https://arxiv.org/abs/1811.03637) [[astro-ph.GA](#)].
126. Galaxy And Mass Assembly (GAMA): a forensic SED reconstruction of the cosmic star formation history and metallicity evolution by galaxy type / S. Bellstedt [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2020. — нояб. — т. 498, № 4. — с. 5581—5603. — DOI: [10.1093/mnras/staa2620](https://doi.org/10.1093/mnras/staa2620). — arXiv: [2005.11917](https://arxiv.org/abs/2005.11917) [[astro-ph.GA](#)].
127. *Abell G. O.* The Distribution of Rich Clusters of Galaxies. // ApJ Supplement. — 1958. — май. — т. 3. — с. 211. — DOI: [10.1086/190036](https://doi.org/10.1086/190036).
128. Catalogue of galaxies and of clusters of galaxies, Vol. I / F. Zwicky [и др.]. — 1961.
129. *Shectman S. A.* Clusters of galaxies from the Shane-Wirtanen counts. // ApJ Supplement. — 1985. — янв. — т. 57. — с. 77—90. — DOI: [10.1086/190996](https://doi.org/10.1086/190996).
130. *Dodd R. J., MacGillivray H. T.* Automated detection of clusters of galaxies. // Astronomical Journal. — 1986. — окт. — т. 92. — с. 706—712. — DOI: [10.1086/114206](https://doi.org/10.1086/114206).
131. The XMM Large-Scale Structure survey: a well-controlled X-ray cluster sample over the D1 CFHTLS area / M. Pierre [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2006. — окт. — т. 372, № 2. — с. 591—608. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2006.10886.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10886.x). — arXiv: [astro-ph/0607170](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0607170) [[astro-ph](#)].
132. *Carlstrom J. E., Holder G. P., Reese E. D.* Cosmology with the Sunyaev-Zel'dovich Effect // Annual Review of Astron and Astrophys. — 2002. — янв. — т. 40. — с. 643—680. — DOI: [10.1146/annurev.astro.40.060401.093803](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.40.060401.093803). — arXiv: [astro-ph/0208192](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0208192) [[astro-ph](#)].

133. *Feroz F., Marshall P. J., Hobson M. P.* Cluster detection in weak lensing surveys // arXiv e-prints. — 2008. — окт. — arXiv:0810.0781. — arXiv: [0810.0781 \[astro-ph\]](#).
134. The Northern Sky Optical Cluster Survey. IV. An Intermediate-Redshift Galaxy Cluster Catalog and the Comparison of Two Detection Algorithms / P. A. A. Lopes [и др.] // *Astronomical Journal*. — 2004. — сент. — т. 128, № 3. — с. 1017—1045. — DOI: [10.1086/423038](#).
135. *Limber D. N.* The Analysis of Counts of the Extragalactic Nebulae in Terms of a Fluctuating Density Field. // *ApJ*. — 1953. — янв. — т. 117. — с. 134. — DOI: [10.1086/145672](#).
136. *Barrow J. D., Bhavsar S. P., Sonoda D. H.* Minimal spanning trees, filaments and galaxy clustering // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1985. — сент. — т. 216. — с. 17—35. — DOI: [10.1093/mnras/216.1.17](#).
137. The Overdensity and Masses of the Friends-of-friends Halos and Universality of Halo Mass Function / S. More [и др.] // *ApJ Supplement*. — 2011. — июль. — т. 195, № 1. — с. 4. — DOI: [10.1088/0067-0049/195/1/4](#). — arXiv: [1103.0005 \[astro-ph.CO\]](#).
138. The Galaxy Angular Correlation Functions and Power Spectrum from the Two Micron All Sky Survey / A. H. Maller [и др.] // *ApJ*. — 2005. — янв. — т. 619, № 1. — с. 147—160. — DOI: [10.1086/426181](#). — arXiv: [astro-ph/0304005 \[astro-ph\]](#).
139. *Ebeling H., Wiedenmann G.* Detecting structure in two dimensions combining Voronoi tessellation and percolation // *Phys. Rev. E*. — 1993. — янв. — т. 47, № 1. — с. 704—710. — DOI: [10.1103/PhysRevE.47.704](#).
140. Finding galaxy clusters using Voronoi tessellations / M. Ramella [и др.] // *Astronomy and Astrophysics*. — 2001. — март. — т. 368. — с. 776—786. — DOI: [10.1051/0004-6361:20010071](#). — URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001A%26A...368..776R>.
141. Ultra Deep Catalogue of Galaxy Structures in the Cosmic Evolution Survey field / I. K. Sochting [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — июль. — т. 423. — с. 2436—2450. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.21050.x](#).

142. *Kibble T. B., Berkshire F. H.* Classical Mechanics. — World Scientific Publishing Company, 2004.
143. *Peacock J. A.* Cosmological Physics. — Princeton University Press, 2009.
144. OPTICS: Ordering Points to Identify the Clustering Structure / M. Ankerst [и др.] // . т. 28. — 06.1999. — с. 49—60. — DOI: [10.1145/304182.304187](https://doi.org/10.1145/304182.304187).
145. Characterization of polyploid wheat genomic diversity using a high-density 90 000 single nucleotide polymorphism array / S. Wang [и др.] // Plant Biotechnology Journal. — 2014. — т. 12, № 6. — с. 787—796. — DOI: <https://doi.org/10.1111/pbi.12183>. — eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/pbi.12183>. — URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/pbi.12183>.
146. A holarchic approach for multi-scale distributed energy system optimisation / J. F. Marquant [и др.] // Applied Energy. — 2017. — т. 208. — с. 935—953. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.057>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917313399>.
147. *Sans Fuentes S. A., De Ridder J., Deboscher J.* Stellar halo hierarchical density structure identification using (F)OPTICS // A&A. — 2017. — март. — т. 599. — A143. — DOI: [10.1051/0004-6361/201629719](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629719).
148. The Large-scale Structure of the Halo of the Andromeda Galaxy. II. Hierarchical Structure in the Pan-Andromeda Archaeological Survey / A. W. McConnachie [и др.] // ApJ. — 2018. — нояб. — т. 868, № 1. — с. 55. — DOI: [10.3847/1538-4357/aae8e7](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aae8e7). — arXiv: [1810.08234](https://arxiv.org/abs/1810.08234) [[astro-ph.GA](#)].
149. Census of ρ Ophiuchi candidate members from Gaia Data Release 2 / H. Cánovas [и др.] // A&A. — 2019. — июнь. — т. 626. — A80. — DOI: [10.1051/0004-6361/201935321](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935321). — arXiv: [1902.07600](https://arxiv.org/abs/1902.07600) [[astro-ph.EP](#)].
150. Deciphering the Large-scale Environment of Radio Galaxies in the Local Universe: Where Are They Born? Where Do They Grow? Where Do They Die? / F. Massaro [и др.] // ApJ Supplement. — 2019. — февр. — т. 240, № 2. — с. 20. — DOI: [10.3847/1538-4365/aaf1c7](https://doi.org/10.3847/1538-4365/aaf1c7). — arXiv: [1811.11179](https://arxiv.org/abs/1811.11179) [[astro-ph.HE](#)].

151. The hierarchical structure of galactic haloes: classification and characterization with HALO-OPTICS / W. H. Oliver [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2021. — март. — т. 501, № 3. — с. 4420—4437. — DOI: [10.1093/mnras/staa3879](https://doi.org/10.1093/mnras/staa3879). — arXiv: [2012.04823](https://arxiv.org/abs/2012.04823) [[astro-ph.GA](#)].
152. An Optical Group Catalog to $z = 1$ from the zCOSMOS 10 k Sample / C. Knobel [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2009. — июнь. — т. 697. — с. 1842—1860. — DOI: [10.1088/0004-637X/697/2/1842](https://doi.org/10.1088/0004-637X/697/2/1842).
153. The MICE grand challenge lightcone simulation - I. Dark matter clustering / P. Fosalba [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2015. — апр. — т. 448, № 4. — с. 2987—3000. — DOI: [10.1093/mnras/stv138](https://doi.org/10.1093/mnras/stv138). — arXiv: [1312.1707](https://arxiv.org/abs/1312.1707) [[astro-ph.CO](#)].
154. The MICE Grand Challenge lightcone simulation - II. Halo and galaxy catalogues / M. Crocce [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2015. — окт. — т. 453, № 2. — с. 1513—1530. — DOI: [10.1093/mnras/stv1708](https://doi.org/10.1093/mnras/stv1708). — arXiv: [1312.2013](https://arxiv.org/abs/1312.2013) [[astro-ph.CO](#)].
155. The MICE Grand Challenge light-cone simulation - III. Galaxy lensing mocks from all-sky lensing maps / P. Fosalba [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2015. — февр. — т. 447, № 2. — с. 1319—1332. — DOI: [10.1093/mnras/stu2464](https://doi.org/10.1093/mnras/stu2464). — arXiv: [1312.2947](https://arxiv.org/abs/1312.2947) [[astro-ph.CO](#)].
156. An algorithm to build mock galaxy catalogues using MICE simulations / J. Carretero [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2015. — февр. — т. 447, № 1. — с. 646—670. — DOI: [10.1093/mnras/stu2402](https://doi.org/10.1093/mnras/stu2402). — arXiv: [1411.3286](https://arxiv.org/abs/1411.3286) [[astro-ph.GA](#)].
157. Measuring the growth of matter fluctuations with third-order galaxy correlations / K. Hoffmann [и др.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2015. — февр. — т. 447, № 2. — с. 1724—1745. — DOI: [10.1093/mnras/stu2492](https://doi.org/10.1093/mnras/stu2492). — arXiv: [1403.1259](https://arxiv.org/abs/1403.1259) [[astro-ph.CO](#)].
158. CosmoHub and SciPIC: Massive cosmological data analysis, distribution and generation using a Big Data platform / J. Carretero [и др.] // Proceedings of the European Physical Society Conference on High Energy Physics. 5-12 July. — 07.2017. — с. 488.

159. CosmoHub: Interactive exploration and distribution of astronomical data on Hadoop / P. Tallada [и др.] // *Astronomy and Computing*. — 2020. — т. 32. — с. 100391. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ascom.2020.100391>. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213133720300457>.
160. The Palomar Distant Clusters Survey. I. The Cluster Catalog / M. Postman [и др.] // *Astronomical Journal*. — 1996. — февр. — т. 111. — с. 165. — DOI: [10.1086/117811](https://doi.org/10.1086/117811).
161. . B. P. Koester [и др.] // *Astronomical Journal*. — 2007. — май. — т. 660. — с. 239—255. — DOI: [10.1086/509599](https://doi.org/10.1086/509599).
162. *Wen Z. L., Han J. L.* Calibration of the Optical Mass Proxy for Clusters of Galaxies and an Update of the WHL12 Cluster Catalog // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — июль. — т. 807. — 11pp. — DOI: [10.1088/0004-637X/807/2/178](https://doi.org/10.1088/0004-637X/807/2/178).
163. *Wen Z. L., Han J. L., Liu F. S.* // *The Astrophysical Journal Supplement*. — 2010. — март. — т. 187. — с. 272—273. — DOI: [10.1088/0067-0049/187/1/272](https://doi.org/10.1088/0067-0049/187/1/272).
164. Spectroscopic Observations of Optically Selected Clusters of Galaxies from the Palomar Distant Cluster Survey / B. P. Holden [и др.] // *The Astronomical Journal*. — 1999. — нояб. — т. 118. — с. 2002—2013. — DOI: [10.1086/30106](https://doi.org/10.1086/30106).
165. A. W. McConnachie [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2009. — май. — т. 365. — с. 255—268. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.14340.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.14340.x).
166. J. Hao [и др.] // *The Astrophysical Journal Supplement*. — 1999. — дек. — т. 191. — с. 254—274. — DOI: [10.1088/0067-0049/191/2/254](https://doi.org/10.1088/0067-0049/191/2/254).
167. A. G. Smith [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — май. — т. 422. — с. 25—43. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.20400.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20400.x).
168. *Grokhovskaya A. A., Dodonov S. N., Mousesyan T. A.* Large Scale Distribution of Galaxies in the Field HS 47.5-22. II. Observational Data Analysis // *Astrophysical Bulletin*. — 2020. — сент. — т. 75, № 3. — с. 219—233. — DOI: [10.1134/S1990341320030062](https://doi.org/10.1134/S1990341320030062). — arXiv: [2006.04930](https://arxiv.org/abs/2006.04930) [[astro-ph.GA](https://arxiv.org/abs/2006.04930)].
169. *Wen Z. L., Han J. L., Liu F. S.* Galaxy Clusters Identified from the SDSS DR6 and Their Properties // *The Astrophysical Journal Supplement*. — 2009. — авг. — т. 183. — с. 197—213. — DOI: [10.1088/0067-0049/183/2/197](https://doi.org/10.1088/0067-0049/183/2/197).

170. *Grokhovskaya A., Dodonov S. N.* Large Scale Distribution of Galaxies in the Field HS 47.5-22. II. Observational Data Analysis // *Astrophysical Bulletin*. — 2020. — июль. — т. 75. — с. 250—266. — DOI: -.
171. I. K. Baldry [и др.] // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2006. — дек. — т. 373, № 2. — с. 469—483. — DOI: [10.1111/j.1365-2966.2006.11081.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.11081.x). — arXiv: [astro-ph/0607648](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0607648) [[astro-ph](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0607648)].
172. N. Scoville [и др.] // *The Astrophysical Journal Supplement*. — 2013. — май. — т. 206. — 26pp. — DOI: [10.1088/0067-0049/206/1/3](https://doi.org/10.1088/0067-0049/206/1/3). — eprint: <https://arxiv.org/pdf/1303.6689.pdf>.

Приложение А

Каталог галактик поля HS 47.5-22

Представлена часть каталога галактик поля HS 47.5-22, полученного в главе 1. Web-доступ к полному каталогу: <https://github.com/ale-gro/gMOSS>

Таблица 6 — Каталог галактик поля HS 47.5-22

GalID	RA	DEC	zph	zph_err	spz	mu	eru	m400	er400	...	m775	er775
23	148.03	47.55	0.533	0.007	0.547	23.23	1.66	23.96	1.58	...	20.23	0.15
24	148.14	47.55	0.322	0.007	-	22.15	0.47	22.25	0.47	...	21.52	0.39
28	147.40	47.55	0.128	0.007	-	22.51	0.63	22.04	0.52	...	-	-
30	148.17	47.55	0.398	0.006	-	22.84	0.70	21.98	0.76	...	19.92	0.13
36	147.44	47.55	0.148	0.006	-	21.88	0.35	21.13	0.16	...	19.35	0.09
31	147.68	47.55	0.904	0.007	-	23.93	2.14	23.93	0.01	...	20.86	0.24
34	148.18	47.55	1.032	0.007	-	22.37	0.54	22.07	0.37	...	-	-
38	147.85	47.55	0.680	0.007	-	-	-	24.05	2.98	...	20.44	0.19
50	147.65	47.55	0.145	0.006	-	21.16	0.50	22.10	1.11	...	20.21	0.22
65	147.50	47.55	0.326	0.006	-	22.72	1.62	22.91	2.40	...	20.40	0.25
66	147.52	47.55	0.903	0.007	-	22.98	1.36	22.41	0.48	...	20.99	0.44
71	147.47	47.55	0.409	0.007	-	21.61	0.24	22.01	0.30	...	-	-
80	148.20	47.55	0.398	0.006	-	22.01	0.80	22.24	0.93	...	20.13	0.21
89	147.80	47.55	0.432	0.007	-	23.29	1.09	22.44	0.76	...	21.34	0.47
92	147.69	47.55	0.539	0.007	-	22.01	0.37	22.75	0.66	...	20.50	0.16
101	147.81	47.55	0.259	0.006	-	23.30	1.76	22.61	0.86	...	20.10	0.17
107	148.46	47.55	0.707	0.006	-	21.77	0.71	21.37	0.46	...	19.98	0.22
112	148.05	47.55	0.241	0.007	-	21.94	0.53	22.05	0.54	...	20.91	0.37
113	147.43	47.55	0.411	0.006	-	22.03	0.75	21.64	0.60	...	20.05	0.23
128	148.20	47.55	0.369	0.007	-	22.57	1.08	21.15	0.29	...	22.63	2.92
131	147.83	47.55	0.158	0.007	-	21.98	0.36	23.05	1.21	...	21.02	0.38
140	148.23	47.55	0.490	0.007	-	22.62	0.94	22.98	1.27	...	21.71	1.03
144	147.39	47.55	0.563	0.007	-	22.12	0.12	22.52	1.69	...	21.42	0.60
146	148.37	47.55	0.235	0.006	-	21.84	0.56	22.14	0.68	...	20.06	0.33
147	147.95	47.55	0.509	0.007	-	23.56	2.15	22.25	0.62	...	21.02	0.53
150	147.59	47.55	0.429	0.006	-	22.30	0.85	22.48	1.82	...	19.96	0.31
159	147.99	47.55	0.201	0.007	-	21.95	0.44	23.78	2.11	...	-	-
164	147.73	47.55	0.169	0.006	-	22.82	2.15	22.68	1.75	...	20.35	0.38
165	147.77	47.55	0.421	0.006	-	22.95	1.52	22.26	0.76	...	19.76	0.13
167	147.38	47.55	0.432	0.007	-	-	-	22.34	0.59	...	-	-
175	147.94	47.55	0.734	0.007	-	22.55	0.87	22.26	0.62	...	21.50	0.66
179	147.88	47.55	0.425	0.007	-	22.73	1.16	-	-	...	21.61	1.43
182	148.34	47.55	0.374	0.006	-	22.88	1.67	23.10	1.90	...	20.52	0.27
187	147.95	47.55	0.719	0.007	-	22.87	1.00	22.87	1.45	...	20.51	0.29
190	147.92	47.55	0.320	0.007	-	23.33	1.05	23.59	1.19	...	21.15	0.37
194	147.93	47.55	0.945	0.007	-	22.24	0.41	22.70	0.53	...	20.84	0.28
199	148.02	47.55	0.734	0.007	-	24.81	3.58	22.28	0.50	...	21.90	0.64
202	147.90	47.55	0.409	0.007	-	23.90	2.28	23.14	1.04	...	20.79	0.34
203	147.61	47.55	0.358	0.007	-	22.75	1.49	22.39	1.00	...	20.56	0.25
206	147.54	47.55	0.414	0.007	-	22.49	1.11	22.13	0.75	...	21.02	0.54
208	148.50	47.55	0.374	0.007	-	21.88	0.30	22.65	0.54	...	21.50	0.53

Приложение Б

Каталог групп галактик поля HS 47.5-22

Б.1 Каталог групп галактик поля HS 47.5-22

Представлена часть каталога групп галактик поля HS 47.5-22, полученного в главе 3. Web-доступ к полному каталогу: <https://github.com/ale-gro/cMOSS>

Таблица 7 — Каталог групп галактик поля HS 47.5-22

GrpID	N	RA	DEC	z	z_fl
1	5	147.83	47.17	0.026	0
2	7	148.39	47.31	0.025	1
3	5	146.98	47.78	0.033	1
4	6	148.29	47.28	0.036	1
5	5	147.26	46.92	0.032	0
6	6	147.42	47.37	0.034	0
7	6	146.80	47.64	0.042	1
8	4	147.45	47.53	0.046	1
9	5	147.34	47.48	0.043	1
10	5	147.19	47.25	0.053	1
11	4	148.02	47.73	0.057	1
12	8	148.48	47.95	0.054	1
13	4	148.44	47.07	0.057	0
14	4	148.45	46.99	0.058	0
15	3	147.31	46.99	0.068	1
16	5	146.91	47.76	0.074	1
17	5	147.11	47.72	0.078	0
18	6	147.87	47.12	0.076	0
19	4	147.30	48.29	0.075	1
20	4	146.64	48.18	0.079	0
21	4	147.11	47.07	0.085	1
22	4	147.09	47.82	0.085	1
23	4	147.44	47.08	0.088	1
24	8	146.95	47.05	0.088	0
25	5	147.52	47.66	0.082	0
26	4	148.52	47.77	0.09	1
27	4	147.02	47.52	0.09	1
28	5	148.33	47.93	0.092	1
29	5	147.40	48.30	0.102	1
30	3	148.39	48.05	0.101	1
31	5	147.05	46.88	0.108	1
32	3	147.02	47.52	0.113	1
33	4	146.64	47.58	0.114	1
34	7	146.68	48.25	0.115	1
35	5	146.95	47.58	0.122	1
36	5	146.86	47.64	0.126	1
37	4	146.66	47.83	0.124	1

Б.2 Каталог галактик-членов групп поля HS 47.5-22

Представлена часть каталога галактик-членов групп поля HS 47.5-22, полученного в главе 3. Web-доступ к полному каталогу: <https://github.com/ale-gro/cMOSS>

Таблица 8 — Каталог галактик-членов групп поля HS 47.5-22

GrpID	GalID	RA	DEC	z_ph	z_sp
1	34	147.83	47.17	0.021	-
1	35	148.00	47.24	0.021	-
1	60	147.94	47.27	0.024	-
1	74	147.82	47.08	0.025	-
1	86	147.77	47.17	0.026	0.026
2	42	148.40	47.25	0.022	-
2	43	148.34	47.31	0.022	-
2	75	148.39	47.31	0.025	-
2	89	148.29	47.34	0.026	0.026
2	88	148.43	47.24	0.026	-
2	96	148.33	47.42	0.027	-
2	106	148.40	47.37	0.028	-
3	112	147.03	47.76	0.029	-
3	152	146.98	47.77	0.033	-
3	154	146.94	47.79	0.033	-
3	210	146.94	47.78	0.037	-
3	222	147.03	47.79	0.038	-
4	131	148.30	47.20	0.031	-
4	167	148.23	47.30	0.033	-
4	168	148.17	47.34	0.033	-
4	165	148.31	47.24	0.033	-
4	166	148.36	47.28	0.033	-
4	2	148.27	47.27	0.036	-
5	138	147.27	46.92	0.032	0.032
5	171	147.26	46.92	0.033	-
5	183	147.29	46.98	0.034	0.034
5	203	147.21	46.92	0.036	-
5	217	147.17	46.88	0.037	0.037
6	169	147.50	47.41	0.033	-
6	181	147.44	47.37	0.034	0.034
6	195	147.40	47.37	0.035	-
6	194	147.33	47.34	0.035	-
6	196	147.38	47.41	0.035	-
6	201	147.54	47.37	0.036	-
7	151	146.82	47.65	0.033	-
7	245	146.79	47.69	0.040	-
7	272	146.79	47.69	0.041	-
7	271	146.82	47.57	0.041	-
7	316	146.81	47.60	0.042	-
7	376	146.74	47.63	0.047	-