

УДК 524.77-34, 524.7-17

КРУПНОМАСШТАБНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЛАКТИК ПОЛЯ HS 47.5-22. II. АНАЛИЗ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

© 2020 А. А. Гроховская^{1*}, С. Н. Додонов^{1**}, Т. А. Мовсесян²¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия²Бюраканская астрофизическая обсерватория НАНА, Бюракан, 0213 Армения

Поступила в редакцию 19 февраля 2020 года; после доработки 14 июля 2020 года; принята к публикации 14 июля 2020 года

Представлены результаты работы по изучению крупномасштабного распределения галактик до $z \sim 0.8$ в поле HS 47.5-22 на основе фотометрических данных 1-м телескопа Шмидта БАО НАН. Полная выборка содержит 28 398 галактик ярче $m_{AB} = 23^m$ до $z \sim 0.8$. Скучивания плотности в крупномасштабном распределении галактик определялись с помощью двух независимых методов восстановления карт контраста плотности в 57 тонких слоях трехмерного распределения галактик: алгоритма с адаптивным ядром и сглаживанием плотности окружения и диаграмм Вороного. Нами было определено более 250 значимых крупномасштабных сгустиваний плотности. Полученные результаты демонстрируют широкий диапазон структур от 0.5 Мпк до 10 Мпк (сопутствующий размер) на полном интервале красных смещений до $z \sim 0.8$.

Ключевые слова: галактики: скопления: общее — галактики: статистика

1. ВВЕДЕНИЕ

Эволюция и физические свойства галактик тесно связаны со свойствами окружающей их среды. Впервые зависимость морфологии галактик от плотности окружения была обнаружена в работах Dressler (1980), Oemler (1974). Позже выяснилось, что не только морфология, но и другие физические свойства галактик коррелируют с плотностью окружающей среды. Так, локальная плотность оказывает влияние на цветовые избытки, эквивалентную ширину линии $H\alpha$ и величину скачка $D4000 \text{ \AA}$ (Kauffmann et al. 2004), темп звездообразования для галактик на близких красных смещениях (Peng et al. 2010). В работах, основанных на обзорах 2dFGRS (2dF Galaxy Redshift Survey, Magwick et al. 2003) и SDSS (Sloan Digital Sky Survey, Guo et al. 2013; 2014), было показано, что связь между локальным окружением и морфологией сохраняется не только в скоплениях галактик, но существует для всего диапазона локальных плотностей вплоть до галактик поля.

Для анализа крупномасштабного распределения галактик и зависимости их физических свойств от плотности окружения наиболее предпочтительно использование спектроскопических красных смещений. Они широко применялись в исследованиях на малых z с относительно

яркими галактиками (например, в Peng et al. 2010). Однако для выборок десятков и сотен тысяч галактик с большими красными смещениями слабее $I_{AB} = 22^m$ и не имеющих сильных линий излучения — это практически невозможно. Спектроскопия таких слабых галактик требует времени экспозиции на самых больших телескопах в несколько часов (Coil et al. 2007, Cooper et al. 2006, Gerke et al. 2005, Le Fèvre et al. 2005, Lilly et al. 2007, Meneux et al. 2006). Именно поэтому фотометрические обзоры с использованием среднеполосных фильтров становятся всё более актуальными.

Существует всего лишь несколько обзоров достаточной глубины, более или менее пригодных для решения задачи анализа крупномасштабного распределения галактик: COMBO-17 (Classifying Objects by Medium-Band Observations, a spectrophotometric 17-filter survey, Wolf et al. 2004), ALHAMBRA (Advanced Large, Homogeneous Area Medium Band Redshift Astronomical Survey, Moles et al. 2008), COSMOS (Cosmic Evolution Survey, Murayama et al. 2007). Часть из этих обзоров, несмотря на значимую суммарную площадь (для COMBO-17 — $0.78 \square^\circ$, для ALHAMBRA — $2.79 \square^\circ$), выполнена на площадках небольшого размера, значительно разнесенных в пространстве, что не позволяет в полной мере восстанавливать крупномасштабное распределение галактик. Широкополосные обзоры, ввиду низкой

*E-mail: grohovskaya.a@gmail.com

**E-mail: dodo@sao.ru

точности определения фотометрических красных смещений и классификации по типам галактик, исключаются из рассмотрения. Спектральные обзоры достаточной площади (Sloan Digital Sky Survey, 2dFGRS Peng et al. 2010) ограничены по глубине, а глубокие спектральные обзоры имеют недостаточную площадь, и выборки объектов не полны в связи с необходимостью предварительной селекции объектов.

Наиболее успешный обзор COSMOS имеет общую площадь $1.95 \square^\circ$ (Murayama et al. 2007) и представляет собой единую площадку (координаты центра $10^{\text{h}}00^{\text{m}}28.60^{\text{s}} + 02^{\text{d}}12^{\text{m}}21.0^{\text{s}}$), однородно покрытую наблюдениями в 30 фильтрах. Кроме того, для почти 20 000 галактик в этом поле получена спектральная информация. На основе этих данных в работе Scoville et al. (2013) было исследовано крупномасштабное распределение галактик этого поля вплоть до красного смещения $z \sim 3.0$ методами диаграмм Вороного (Voronoi tessellation) и адаптивного сглаживания (adaptive smoothing). Авторы этой работы подтверждают зависимость физических параметров галактик (звездная масса, спектральные распределения энергии, скорость звездообразования) от плотности окружения, а также показывают сильную зависимость для галактик раннего типа от плотных областей крупномасштабного распределения галактик.

В предлагаемой работе представлены результаты изучения крупномасштабного распределения плотности галактик поля HS 47.5-22 (Hamburg Quasar Survey, Molthagen et al. 1997) с использованием высокоточных фотометрических красных смещений до $z \sim 0.8$ и качественной классификации галактик по типам спектрального распределения энергии. Раздел 2 посвящен описанию проведенных наблюдений. В разделе 3 обсуждается выборка галактик, определение фотометрических красных смещений и классификация галактик. Для определения крупномасштабных структур использованы два независимых метода — алгоритм с адаптивной апертурой и сглаживанием и двумерные диаграммы Вороного (раздел 4). Карты крупномасштабного распределения галактик, а также анализ полученных результатов представлены в разделе 5. В статье используется космологическая Λ CDM-модель с параметрами $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$ и $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1}$.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения проводились на 1-м телескопе Шмидта Бюраканской астрофизической обсерватории на протяжении нескольких сетов в феврале, марте, апреле и ноябре 2018 г. и в феврале и ноябре 2019 г. Для наблюдений было выбрано поле HS 47.5-22 (с координатами центра

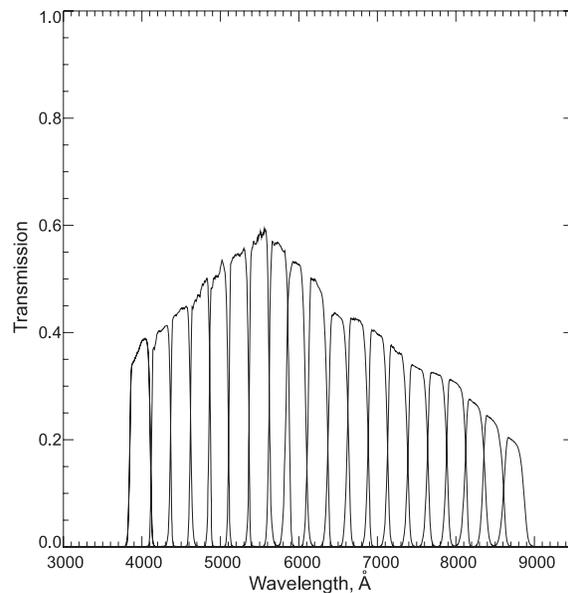


Рис. 1. Набор фильтров 1-м телескопа Шмидта БАО НАН. Пропускание фильтров измерено в $F/2$ с учетом спектральной чувствительности CCD-детектора.

$09^{\text{h}}50^{\text{m}}00^{\text{s}} + 47^{\text{d}}35^{\text{m}}00^{\text{s}}$) — одно из полей с глубоким накоплением рентгеновского спутника ROSAT (Molthagen et al. 1997). Суммарное время экспозиции более 5000 с для 73% площади и более 20 000 с для центральной области размером $2.3 \square^\circ$. Предельный поток в $3.4 \times 10^{-14} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ был получен для объектов в диапазоне энергий 0.1–2.4 keV. Выбор поля для наблюдений обусловлен его расположением в области с очень низкой плотностью нейтрального водорода на луче зрения $\langle N_{\text{H}} \rangle = 10^{20} \text{ см}^{-2}$, что ненамного выше значения поглощения в области «дыры Локмана» (Lockman et al. 1986), где наблюдается самое низкое поглощение на луче зрения для северного неба $\langle N_{\text{H}} \rangle = 4.5 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$.

Для поля HS 47.5-22 были проведены наблюдения в 4 широкополосных фильтрах (u, g, r, i системы SDSS) и 16 средне-полосных фильтрах ($\text{FWHM} = 250 \text{ Å}$, с равномерным покрытием спектрального диапазона 4000–8000 Å) до $R_{\text{AB}} = 23^{\text{m}}$ (см. таблицу 1, рис. 1). Центральная часть поля, размером $2.386 \square^\circ$, была покрыта четырьмя наборами экспозиций в широкополосных и средне-полосных фильтрах. Перекрытия соседних наборов составляли около $10'$. Суммарное время экспозиции подбиралось таким образом, чтобы достичь глубины $m_{\text{AB}} \approx 25^{\text{m}}$ с соотношением $S/N \sim 5$ в широкополосных (около 2 часов) и $m_{\text{AB}} \approx 23^{\text{m}}$ с соотношением $S/N \sim 5$ в среднеполосных фильтрах (около 60 мин. в пике кривой чувствительности детектора и около 2 часов на краях диапазона).

Таблица 1. Набор фильтров 1-м телескопа Шмидта БАО НАН. Эффективная длина волны, FWHM, Предельная звездная величина, измеренная на уровне $S/N \sim 5$

Фильтр	$\lambda_{\text{cen}}, \text{\AA}$	FWHM, \AA	$m_{\text{lim}, 5\sigma}$
u_{SDSS}	3578	338	24.23
g_{SDSS}	4797	860	25.22
r_{SDSS}	6227	770	24.97
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

3. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ КРАСНЫЕ СМЕЩЕНИЯ И ВЫБОРКА ГАЛАКТИК

Выборка галактик поля HS 47.5-22 построена на основе глубоких ($m_{\text{AB}} \approx 25^{\text{m}}$) снимков в широкополосных фильтрах системы SDSS (g , r и i) и ограничена предельной звездной величиной $m_{\text{AB}} \approx 23^{\text{m}}$, до которой получены снимки в среднеполосных фильтрах с отношением $S/N \sim 5$. Общее число галактик поля около 100 000, в выборку галактик, предназначенную для изучения, вошли 28 398 галактик удовлетворяющим критериям отбора (см. раздел 3.1).

Фотометрические свойства выборки галактик поля HS 47.5-22 были исследованы в диапазоне от 4000 \AA до 8000 \AA , что позволяет уверенно определять красные смещения галактик от $z = 0$

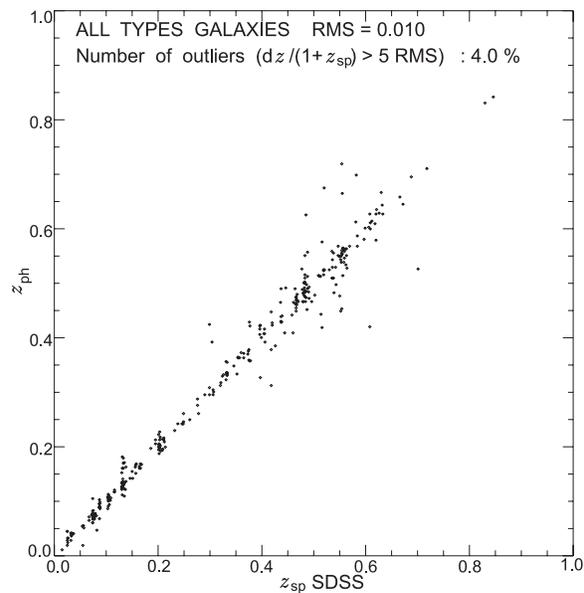


Рис. 2. Сравнение фотометрических красных смещений галактик z_{ph} , полученных с помощью программы ZEBRA в режиме Maximum Likelihood (Feldmann et al. 2006), со спектроскопическими красными смещениями галактик z_{sp} , взятыми из SDSS (Guo et al. 2013; 2014), с распределением ошибок $\Delta z/(1+z)$ для 473 галактик с известными спектроскопическими красными смещениями. Точность определения фотометрического красного смещения $\sigma_z < 0.01$, процент выбросов $\Delta z/(1+z) > 5\sigma_z \sim 4.0\%$.

до $z = 0.8$. Фотометрия галактик выполнена с помощью программы SExtractor (Bertin and Arnouts 1996) в режиме двойных изображений (dual image mode), где в качестве опорного изображения использовался композитный снимок поля, созданный на основе снимков в широкополосных фильтрах g , r и i системы SDSS (подробно процедура фотометрии и калибровки данных будет описана в работе Dodonov (in prep.)).

По результатам фотометрии в 17 фильтрах (u_{SDSS} и 16 среднеполосных фильтров) были построены спектральные распределения энергии низкого разрешения (SED, Spectral Energy Distribution) для всех галактик выборки. Полученные распределения энергии были использованы для оценки фотометрического красного смещения и классификации галактик.

Метод определения фотометрического красного смещения и типа SED галактик основан на соответствии спектрального шаблона галактики наблюдаемому распределению энергии. В качестве опорных спектров для определения фотометрических красных смещений использованы спектры из работы Dodonov and Chilingarian (2008) и пакет программ ZEBRA (Zurich's Extragalactic Bayesian Redshift Analyzer, Feldmann et al. 2006).

Точность определения фотометрических красных смещений всех типов галактик составила $\sigma_z < 0.01$, а процент выбросов ($\Delta z / (1 + z) > 5\sigma_z$) порядка 4.0% (рис. 2). Точность σ_z варьируется от 0.01 для объектов со звездной величиной $16^m - 21^m$ в фильтре r_{SDSS} до 0.03 для $21^m - 23^m$. Ошибки в определении типа галактики не превышают примерно 3.0% от общего числа объектов на величинах слабее $R_{AB} = 22^m$.

3.1. Выборка галактик

Выборка галактик для изучения была произведена из полного фотометрического каталога (около 100 000 объектов) по следующим критериям:

- 1) $0 < z \leq 0.8$;
- 2) Объекты ярче $R_{AB} = 23^m$;
- 3) Индекс протяженности менее 0.8 для объектов ярче $R_{AB} = 21^m$, индекс протяженности менее 0.9 для объектов ярче $21^m < R_{AB} < 22^m$ и индекс протяженности менее 0.96 для объектов ярче $R_{AB} < 23^m$ (Bertin and Arnouts 1996);
- 4) Степень искажения фотометрии не более двух (Bertin and Arnouts 1996).

Индекс протяженности (или `class_star` в терминах SExtractor) характеризует степень отличия объекта от звездообразного. Он изменяется от 1 до 0. Обычно объекты с индексом 1–0.8 относят к звездообразным, все остальные к протяженным.

Степень искажения фотометрии (или `contamination_index`) имеет четыре значения: 0, 1, 2 и 3. Она рассчитывается, исходя из $FWHM_{Obj1}$ и $FWHM_{Obj2}$ объектов, находящихся в непосредственной близости. Если объекты находятся на расстоянии большем чем $(3.1566 FWHM_{Obj1} + 3.1566 FWHM_{Obj2})/2$ — индекс равен 0, т.е. фотометрия объектов искажена менее чем на 0.1%. Для расстояния $(2.5774 FWHM_{Obj1} + 2.5774 FWHM_{Obj2})/2$ между объектами индекс равен 1, т.е. фотометрия объектов искажена менее чем на 20.0%. Для расстояния $(1.5238 FWHM_{Obj1} + 1.5238 FWHM_{Obj2})/2$ индекс равен 2, т.е. фотометрия объектов искажена менее чем на 30.0%. Если фотометрия искажена более чем на 30%, то индекс равен 3.

Применив эти четыре критерия к первоначальной выборке из более чем 100 000 объектов, мы получили выборку из 28 398 галактик, которая полностью удовлетворяет заданным условиям. На рис. 3 приведено распределение галактик по красному смещению, а также сравнение с аналогичной выборкой галактик каталога COSMOS (Scoville et al. 2013).

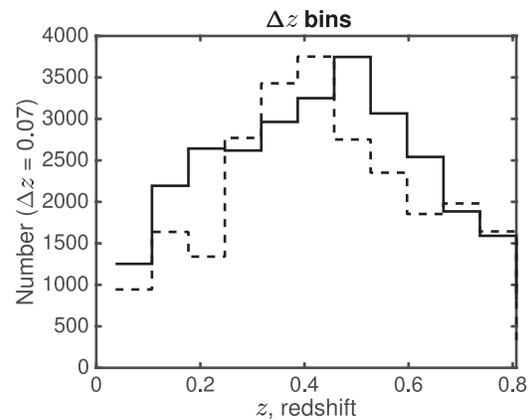


Рис. 3. Распределение количества галактик как функция красного смещения для всех типов галактик для выборки, используемой в этой работе (сплошная линия), и выборки из работы COSMOS (пунктирная линия) (Scoville et al. 2013) показаны для принятых критериев отбора ($R_{AB} < 23$ mag при $0 < z \leq 0.8$). Ширина интервалов по красному смещению $\Delta z = 0.07$.

3.2. Классификация галактик

Определение спектральных типов галактик выполнено с помощью программы ZEBRA (Feldmann et al. 2006) и опорных спектров для определения спектрального типа галактик из работы Dodonov and Chilingarian (2008). Для дальнейшего изучения физических свойств галактик и их зависимостей, полная выборка галактик была разделена на три группы по типам галактик, соответствующим шаблонам:

- 1) галактики ранних типов E–Sa;
- 2) галактики поздних типов Sab–Sd;
- 3) неправильные галактики и галактики со вспышкой звездообразования IRR/SB.

Распределение галактик по красному смещению для всех галактик поля в зависимости от спектрального типа представлено на рис. 4. На этом рисунке также представлены данные аналогичной выборки галактик из работы Ilbert et al. (2008).

Высокая точность фотометрических красных смещений и глубокая фотометрия позволяют решать задачу изучения полного диапазона крупномасштабных структур с большим количеством объектов на больших красных смещениях (до $z \sim 0.8$) и минимизацией эффектов флуктуаций пространственного распределения галактик за счет достаточной площади исследуемого поля.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ВОКРУГ ГАЛАКТИК

Плотность окружения для каждой галактики была рассчитана из локальной поверхностной

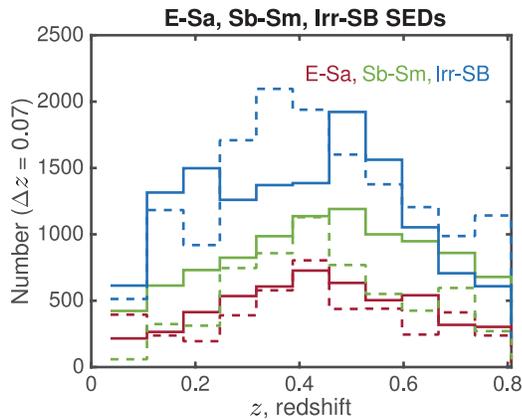


Рис. 4. Распределение красного смещения трех групп галактик из этой работы (сплошные линии), и выборки из работы COSMOS (пунктирные линии) (Scoville et al. 2013) показаны для принятых критериев отбора ($R_{AB} < 23$ mag при $0 < z \leq 0.8$). Ширина интервалов по красному смещению $\Delta z = 0.07$.

плотности галактик в пределах тонких слоев по красному смещению (раздел 4.1) на основе фотометрических красных смещений для 28 398 галактик из каталога, полученного на 1-м телескопе Шмидта (БАО НАН). Для определения крупномасштабных сгущений плотности в распределении галактик использовались два метода: алгоритм с адаптивной апертурой и сглаживанием плотности окружения и двумерные диаграммы Вороного (Grokhovskaya and Dodonov 2019).

4.1. Тонкие слои по красному смещению

Для определения сгущений плотности в распределении галактик важна согласованность между шириной слоя, в котором происходит выделение структур, и точностью определения фотометрического красного смещения. Использование слишком тонких слоев по красному смещению ведет к недоопределению структур и их членов. Для широких слоев характерна проекция галактик с отличающимся красным смещением на крупномасштабные структуры, которым они не принадлежат.

Точность определения фотометрических красных смещений для созданного нами каталога галактик составляет $\sigma_z < 0.01$. Исходя из этого ширина слоя по красному смещению: $\Delta z = 2\sigma_z(1+z)$ или $\Delta z = 0.02(1+z)$. К каждому интервалу было добавлено по 25% от его значения с каждой стороны, чтобы избежать потерь в определении крупномасштабных структур на границе слоев.

4.2. Методы определения плотности окружающей среды

Мы использовали два метода определения сгущений плотности в распределении галактик: алгоритм с адаптивной апертурой и сглаживанием

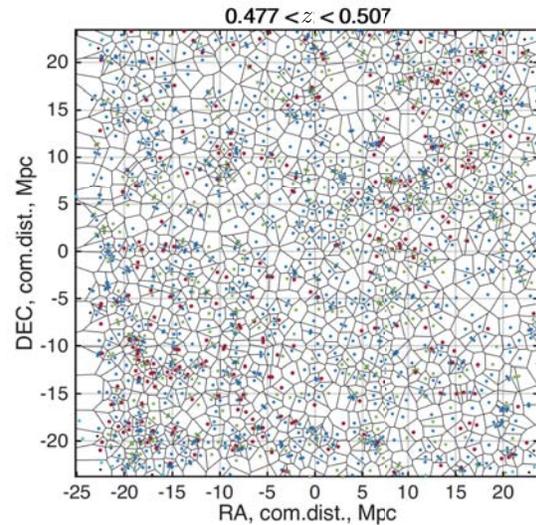


Рис. 5. Диаграммы Вороного, построенные для слоя $0.477 \leq z \leq 0.507$. Области Вороного в двумерном пространстве показывают область, каждая точка которой находится ближе к отдельной галактике из выборки, чем к любой другой. На диаграмме отдельные галактики показаны красными, зелеными или синими точками в зависимости от типа SED-галактики (галактики ранних типов E-Sa, поздних типов Sab-Sd и неправильные галактики и галактики со вспышкой звездообразования IRR/SB, соответственно). Голубые точки указывают на галактики, для которых области Вороного не закрыты, такие галактики исключаются из расчета плотности в дальнейшем.

плотности окружения и двумерные диаграммы Вороного (Grokhovskaya and Dodonov 2019).

Для диаграмм Вороного каждая галактика находится на фотометрическом красном смещении, определенном пакетом программ ZEBRA (Feldmann et al. 2006) в режиме Maximum Likelihood (метод максимального правдоподобия). Поскольку мы используем двумерные диаграммы Вороного, то галактика считается принадлежащей конкретному слою, если ее красное смещение (без учета неопределенности) попадает в интервал красных смещений слоя. Поскольку краевые галактики не имеют замкнутых областей Вороного (рис. 5), количество галактик в выборке для диаграмм Вороного меньше 28 398 галактик полной выборки и составляет 27 446.

Для алгоритма Вороного был добавлен шаг с интерполяцией значений плотности окружения, полученных в соответствии с Grokhovskaya and Dodonov (2019) (рис. 6).

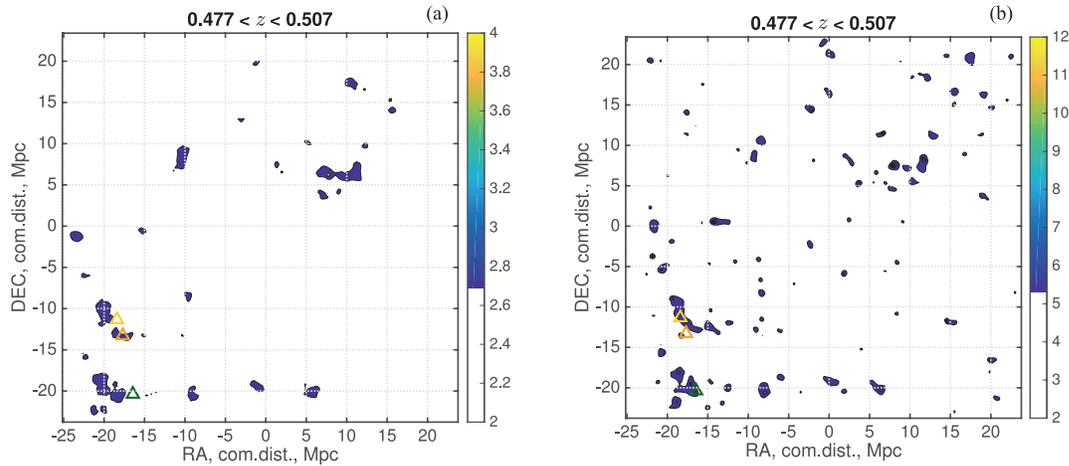


Рис. 6. Карты контраста плотности, построенные для слоя $0.477 \leq z \leq 0.507$ методом адаптивной апертуры со сглаживанием плотности окружения (a) и методом диаграмм Вороного (b). Цветовой бар показывает во сколько раз превышена плотность окружения по сравнению со средней плотностью в слое. Треугольниками отмечены центры скоплений WHL J094637.9+471440 (желтый), WHL J094645.7+471107 (оранжевый), WHL J094659.9+465810 (зеленый) из каталога Wen and Nap (2009), которые были обнаружены по излучению в рентгеновском диапазоне длин волн. Эти скопления также детектируются обоими нашими методами. Полный набор из 57 срезов по красному смещению доступен на https://github.com/ale-gro/density_maps.

Таблица 2. Известные скопления поля HS47.5-22, обнаруженные методами диаграмм Вороного и алгоритма с адаптивной апертурой и сглаживанием

№	Имя	Координаты центра, RA	Координаты центра, DEC	z (NED*)	z_{phot}	δ_z
1	PDCS 043	09 ^h 52 ^m 15.1 ^s	+47 ^d 57 ^m 44 ^s	0.2000	—	—
2	PDCS 040	09 ^h 53 ^m 25.6 ^s	+47 ^d 58 ^m 55 ^s	0.2028	0.205	0.011
3	PDCS 042	09 ^h 53 ^m 54.3 ^s	+48 ^d 00 ^m 04 ^s	0.1992	0.199	0.012
4	PDCS 039	09 ^h 51 ^m 25.2 ^s	+47 ^d 49 ^m 50 ^s	0.6000	0.484	0.014
5	PDCS 008s	09 ^h 53 ^m 49.9 ^s	+47 ^d 52 ^m 28 ^s	0.6000	0.698	0.017
6	PDCS 037	09 ^h 51 ^m 41.5 ^s	+47 ^d 41 ^m 30 ^s	0.6000	0.648	0.017
7	PDCS 035	09 ^h 52 ^m 31.2 ^s	+47 ^d 36 ^m 27 ^s	0.6000	0.648	0.017
8	PDCS 036	09 ^h 53 ^m 53.7 ^s	+47 ^d 40 ^m 15 ^s	0.2480	0.247	0.013
9	PDCS 033	09 ^h 52 ^m 13.1 ^s	+47 ^d 16 ^m 48 ^s	0.6400	0.600	0.016
10	PDCS 006s	09 ^h 49 ^m 56.5 ^s	+47 ^d 06 ^m 40 ^s	0.4000	0.462	0.015
11	PDCS 029	09 ^h 53 ^m 12.1 ^s	+47 ^d 08 ^m 58 ^s	0.4000	0.412	0.014
12	WHL J095357.5 +481431	09 ^h 53 ^m 57.5 ^s	+48 ^d 14 ^m 31 ^s	0.13505	0.135	0.011
13	WHL J095323.9 +481431	09 ^h 53 ^m 23.92 ^s	+47 ^d 58 ^m 42.5 ^s	0.2030	0.204	0.011
14	WHL J095312.2 +473822	09 ^h 53 ^m 12.17 ^s	+47 ^d 38 ^m 22.3 ^s	0.5543	0.568	0.016
15	WHL J095027.9 +481435	09 ^h 50 ^m 27.86 ^s	+48 ^d 14 ^m 35.3 ^s	0.2085	0.199	0.012
16	WHL J094930.4 +481756	09 ^h 49 ^m 30.4 ^s	+48 ^d 17 ^m 56 ^s	0.2047	0.199	0.012
17	WHL J094933.0 +474050	09 ^h 49 ^m 32.99 ^s	+47 ^d 40 ^m 49.7 ^s	0.5554	0.552	0.016

Таблица 2. (Продолжение)

№	Имя	Координаты центра, RA	Координаты центра, DEC	z (NED)	z_{phot}	δ_z
18	WHL J094840.1 +475045	09 ^h 48 ^m 40.1 ^s	+47 ^d 50 ^m 45 ^s	0.3934	—	—
19	WHL J094657.3 +481526	09 ^h 46 ^m 57.3 ^s	+48 ^d 15 ^m 26.1 ^s	0.3745	0.378	0.014
20	WHL J094557.8 +481035	09 ^h 45 ^m 57.78 ^s	+48 ^d 10 ^m 35.2 ^s	0.3451	0.350	0.013
21	WHL J094651 +481816	09 ^h 46 ^m 51.8 ^s	+48 ^d 18 ^m 16 ^s	0.3521	0.364	0.014
22	WHL J094913.0 +472248	09 ^h 49 ^m 12.99 ^s	+47 ^d 22 ^m 47.7 ^s	0.3061	0.310	0.013
23	WHL J094725.0 +471747	09 ^h 47 ^m 24.97 ^s	+47 ^d 17 ^m 46.6 ^s	0.3249	0.324	0.013
24	WHL J094637.9 +471440	09 ^h 46 ^m 37.9 ^s	+47 ^d 14 ^m 40.2 ^s	0.4830	0.484	0.015
25	WHL J094645.7 +471107	09 ^h 46 ^m 45.74 ^s	+47 ^d 11 ^m 07.4 ^s	0.4805	0.492	0.015
26	WHL J094659.9 +465810	09 ^h 46 ^m 59.92 ^s	+46 ^d 58 ^m 10.2 ^s	0.4878	0.492	0.015
27	WHL J094642.2 +465857	09 ^h 46 ^m 42.2 ^s	+46 ^d 58 ^m 57.0 ^s	0.5323	0.537	0.015
28	WHL J094827.1 +465935	09 ^h 48 ^m 27.1 ^s	+46 ^d 59 ^m 35.1 ^s	0.3960	0.405	0.014
29	WHL J094615.2 +470016	09 ^h 46 ^m 15.2 ^s	+47 ^d 00 ^m 16 ^s	0.3030	0.298	0.013
30	WHL J094957.2 +471031	09 ^h 49 ^m 57.2 ^s	+47 ^d 10 ^m 31 ^s	0.4050	0.412	0.014
31	WHL J094952.4 +465934	09 ^h 49 ^m 52.3 ^s	+46 ^d 59 ^m 34 ^s	0.3520	0.364	0.014
32	WHL J095328.5 +465708	09 ^h 53 ^m 28.53 ^s	+46 ^d 57 ^m 07.7 ^s	0.2479	0.247	0.013
33	GHO 0947+4758	09 ^h 51 ^m 09.90 ^s	+47 ^d 43 ^m 54.0 ^s	0.3342	0.344	0.014
34	GHO 0949+4732	09 ^h 52 ^m 29.00 ^s	+47 ^d 17 ^m 49.0 ^s	0.3000	0.235	0.013
35	SDSSCGB 00840	09 ^h 51 ^m 18.60 ^s	+48 ^d 13 ^m 18.0 ^s	0.1320	0.129	0.011
36	GMBCG J148.37587 +47.68093	09 ^h 53 ^m 30.20 ^s	+47 ^d 40 ^m 51.0 ^s	0.3770	0.364	0.014
37	NSC J095412 +481348	09 ^h 54 ^m 12.0 ^s	+48 ^d 13 ^m 07.0 ^s	0.1933	0.141	0.012
38	SDSSCGB 27386	09 ^h 49 ^m 04.90 ^s	+47 ^d 47 ^m 13.0 ^s	0.2150	0.135	0.011
39	GMBCG J147.17119 +47.79663	09 ^h 48 ^m 41.10 ^s	+47 ^d 47 ^m 48.0 ^s	0.3620	0.364	0.016
40	GMBCG J146.74573 +48.16905	09 ^h 46 ^m 59.00 ^s	+48 ^d 10 ^m 09.0 ^s	0.3170	0.311	0.013
41	GMBCG J147.32896 +47.16263	09 ^h 49 ^m 18.90 ^s	+47 ^d 09 ^m 45.0 ^s	0.4890	0.537	0.015
42	SDSSCGB 04432	09 ^h 46 ^m 45.1 ^s	+47 ^d 12 ^m 58.0 ^s	0.1040	0.096	0.011
43	Mr20:[BFW2006] 22757	09 ^h 47 ^m 49.70 ^s	+47 ^d 03 ^m 53.0 ^s	0.0857	0.096	0.011
44	MSPM 01061	09 ^h 49 ^m 10.0 ^s	+46 ^d 58.6 ^m	0.03282	0.038	0.010

Для работы с наблюдательными данными 1-м телескопа Шмидта также был использован алгоритм с адаптивной апертурой и сглаживанием контраста плотности окружения для каждой из исследуемых галактик. Необходимость сглаживания по красному смещению обусловлена тем, что фотометрическое красное смещение определяется не точно, а с некой погрешностью. Поэто-

му при выделении крупномасштабных структур вначале рассчитывалась плотность окружения по формулам, описанным в работе Grokhovskaya and Dodonov (2019). Затем плотность окружения для каждой из галактик сглаживалась фильтром Гаусса по красному смещению с шириной фильтра $2\sigma_z$. Таким образом, было получено псевдотрехмерное распределение плотности окружения для каждой

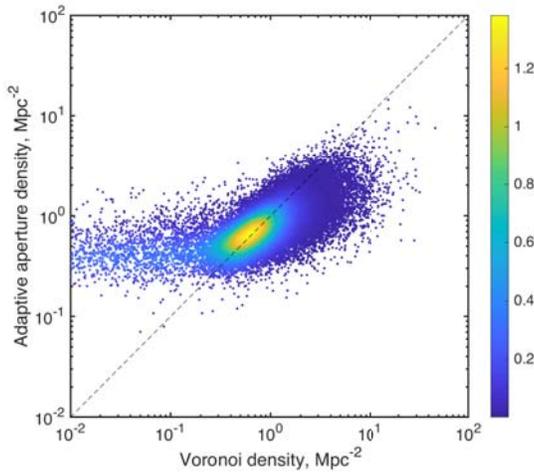


Рис. 7. Сравнение поверхностной плотности окружения для каждой галактики, полученной с помощью алгоритма Вороного и плотности, полученной алгоритмом с адаптивной апертурой и сглаживанием плотности окружения. Цветом обозначена плотность вероятности для каждой галактики. На протяжении трех порядков значений плотностей, оба алгоритма дают схожий результат для большого числа объектов, близкий к прямой 1:1, обозначенной пунктирной линией. Выброс от этого распределения, находящийся в крайнем левом положении, можно объяснить тем, что алгоритм с адаптивной апертурой выделяет только значимые сгущения плотности, в то время как алгоритм диаграмм Вороного определяет любые превышения плотности над средним значением.

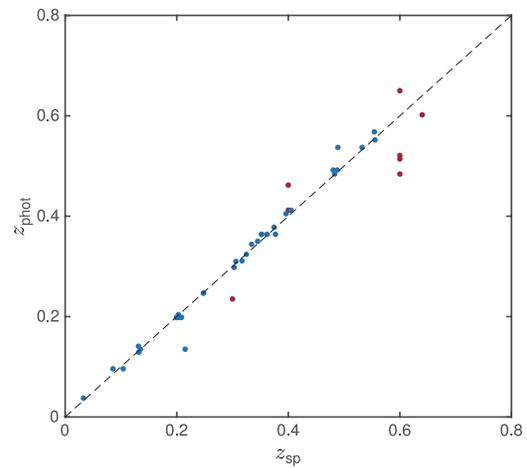


Рис. 8. Сравнение фотометрических красных смещений скоплений галактик z_{ph} , полученных с помощью методов диаграмм Вороного и алгоритма с адаптивной апертурой и сглаживанием, со спектроскопическими красными смещениями галактик z_{sp} , взятыми из работ (Hao et al. 1999, Holden et al. 1999, Koester et al. 2007, McConnachie et al. 2009, Postman et al. 1996, Smith et al. 2012, Wen and Han 2009) с распределением ошибок $\Delta z/(1+z)$ для 42 скоплений галактик с известными спектроскопическими (синие точки) и фотометрическими (красные точки) красными смещениями. Разброс значений при определении фотометрического красного смещения скоплений $\delta_z < 0.017$.

галактики с учетом неопределенности ее красного смещения в тонком пространственном срезе. Далее производилась трехмерная интерполяция полученных значений и проекция полученных трехмерных результатов на двумерную картинную плоскость (плоскость Ra–Dec, рис. 6).

Каждый из методов (диаграммы Вороного, алгоритм с адаптивной апертурой и сглаживанием) имеет свои преимущества и недостатки. При этом методы дают согласованный результат в определении крупномасштабных структур в распределении галактик, что обеспечивает уверенность в полученных результатах (рис. 7). Так, с помощью обоих методов были обнаружены сгущения плотности, соответствующие практически всем известным скоплениям и группам галактик в поле HS 47.5-22. Полный список из 44 скоплений поля приведен в таблице 2, из них было обнаружено 42 скопления. Все восстановленные скопления и группы галактик, обнаруживаются в пределах погрешности определения их красного смещения δ_z , которая рассчитывается как половина ширины тонкого слоя по красному смещению (рис. 8). Нами не обнаружены два скопления галактик: PDCS 043 ($z_{phot} = 0.200$) и WHL J094840.1+475045 ($z_{spec} = 0.393$). В комментари-

ях авторы работы Postman et al. (1996) пишут, что PDCS 043 не обнаружено в фильтре *I* и имеет малое количество членов скопления. В центре скопления WHL J094840.1+475045 находятся две галактики на $z_{spec} = 0.396$ и $z_{spec} = 0.399$, и в пределах радиуса 1 Мпк обнаруживаются только две галактики с $z_{phot} = 0.393 \pm 0.015$, (рис. 9). Видимо, скопление галактик выделено авторами Wen and Han (2009) ошибочно.

Оба метода определяют двумерную поверхностную плотность галактик в каждом слое красного смещения, а не истинную объемную плотность галактик. 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 в 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 (см. раздел 4.1).

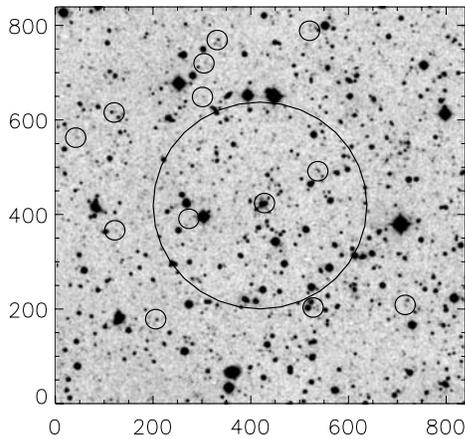


Рис. 9. Карта окрестностей ($15' \times 15'$) скопления WHL J094840.1+475045. Маленькими кружками показаны галактики с $z_{\text{phot}} = 0.393 \pm 0.015$, радиус круга большего диаметра равен 1 Мпк.

4.3. Сравнение алгоритма с адаптивной апертурой и диаграмм Вороного

Несмотря на то, что подходы и ограничения метода с адаптивной апертурой и сглаживанием плотности окружения и диаграмм Вороного к построению карт контраста плотности сильно разнятся, они дают согласованный результат. На рис. 6 показано распределение соотношения контраста плотности окружения, определенного для каждой галактики методом с адаптивной апертурой и сглаживанием и методом диаграмм Вороного, для выборки из 27 446 галактик. Это количество галактик немного меньше общего числа галактик выборки из-за того, что внешние ячейки Вороного не закрыты, и для этих галактик не получена оценка площади ячейки и плотности окружения. На протяжении трех порядков значений плотностей, оба алгоритма дают схожий результат для большого числа объектов, близкий к прямой 1:1, обозначенной пунктирной линией.

Результаты, полученные с помощью метода с адаптивной апертурой и сглаживанием плотности окружения, обладают более высокой чистотой выборки (см. Grokhovskaya and Dodonov (2019)) и обнаруживают только значимые крупномасштабные сгущения плотности. Метод диаграмм Вороного воссоздает более зашумленную восстановленную выборку сгущений плотности, при этом детализация карт контраста плотности, полученных данным методом, выше, чем для карт, полученных методом с адаптивной апертурой и сглаживанием.

В целом использование двух независимых методов для построения карт контраста плотности обеспечивает уверенность в полученных

результатах. Карты контраста плотности для поля HS 47.5-22 для всего диапазона срезов по красному смещению до $z \sim 0.8$ доступны на <https://github.com/ale-gro/densitymaps>.

5. КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА ПОЛЯ HS 47.5-22

Рисунок 5 показывает диаграммы Вороного для каждой галактики (красный цвет для галактик с SED ранних типов E–Sa, зеленый — для SED поздних типов Sab–Sd и синий — для неправильных галактик и галактик со вспышкой звездообразования IRR/SB) для среза $0.477 \leq z \leq 0.507$. На рис. 6b показаны полученные из анализа диаграмм Вороного карты контраста плотности для того же среза и на рис. 10 (справа) карты контраста плотности для каждого пятого среза по красному смещению. Аналогично, на рис. 6a и на рис. 10 (слева) — карты контраста, восстановленные методом с адаптивной апертурой и сглаживанием. Эти рисунки хорошо иллюстрируют пространственные сгущения плотности в распределении галактик. На полученных картах контраста плотности показан широкий диапазон крупномасштабных сгущений плотности от 0.5 до 10 Мпк (сопутствующий размер) на протяжении полного интервала красных смещений. Сгущения плотности демонстрируют различные пространственные формы от практически правильных круглых до вытянутых удлиненных филаментов.

Большие выборки галактик, доступные из каталогов фотометрических красных смещений, позволяют картировать структуры даже при относительно низких плотностях. Нами были обнаружено более 250 областей с высоким контрастом плотности на масштабах от 0.5 Мпк до 10 Мпк (сопутствующий размер). Каталог кандидатов в скопления и группы галактик будет опубликован в работе Grokhovskaya (in prep.).

На рис. 11 представлен полный диапазон значений контраста плотности для окружения галактик из исследуемой выборки в зависимости от красного смещения. Контуром показано относительное количество галактик как функция контраста плотности окружающей среды и красного смещения. В целом между значениями, полученными двумя независимыми методами определения плотности, видно хорошее соответствие результатов: как по относительному количеству галактик при различной плотности окружающей среды, так и по изменению структуры контраста плотности с красным смещением. Однако, набор значений контраста плотности для каждой из галактик выборки, полученный методом с адаптивной апертурой и сглаживанием, содержит меньше сверхплотных и сверх разреженных областей. Это вызвано тем, что

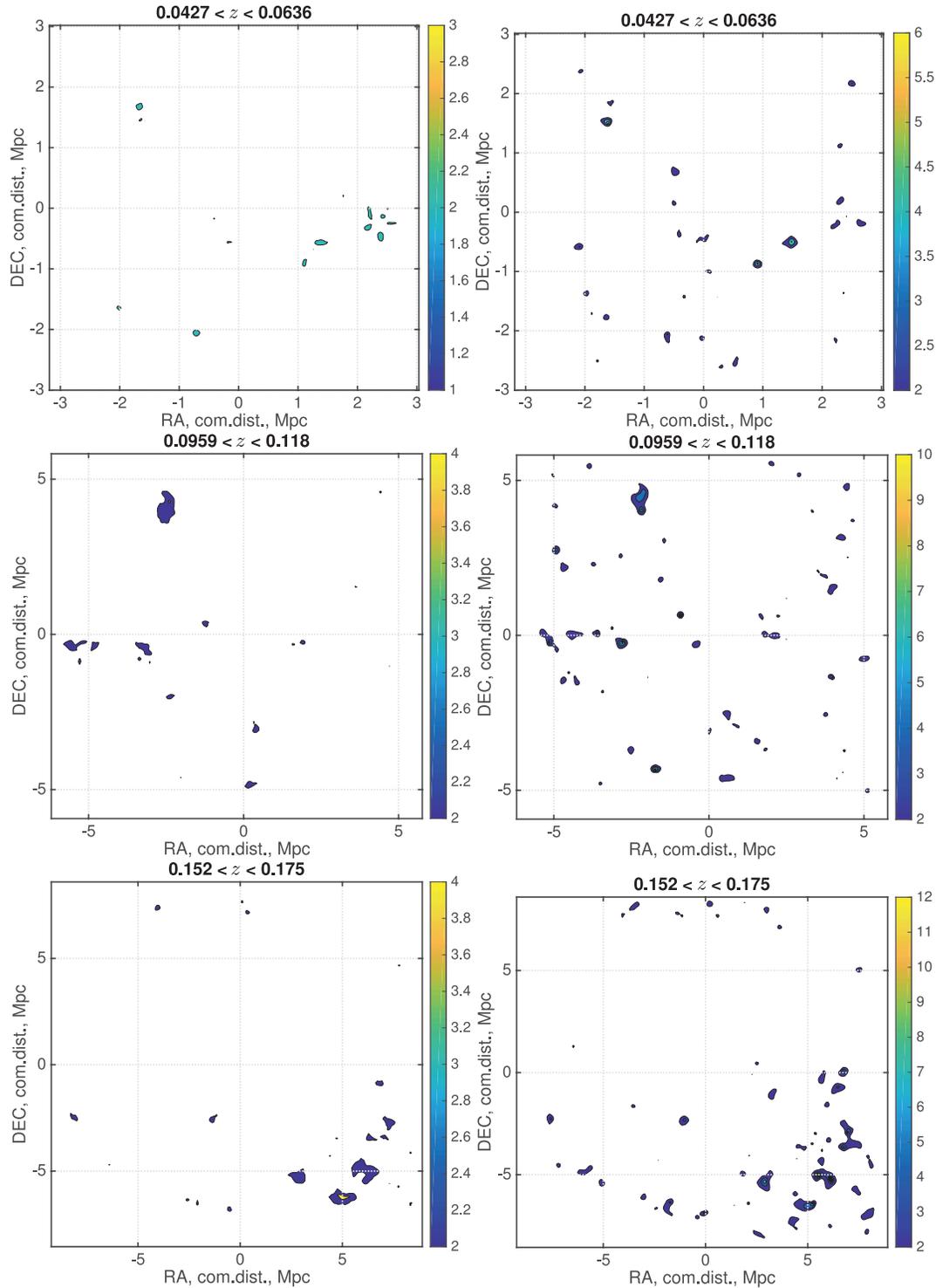


Рис. 10. Карты контраста плотности, построенные для каждого пятого слоя методом диаграмм Вороного (справа) и методом адаптивной апертуры со сглаживанием плотности окружения (слева). Цветовой бар показывает, во сколько раз превышена плотность окружения по сравнению со средней плотностью в слое. В качестве осей взяты координаты прямого восхождения (RA) и склонения (DEC), выраженные в Мпк (сопутствующее расстояние). Полный набор из 57 срезов по красному смещению доступен на <https://github.com/ale-gro/densitymaps>.

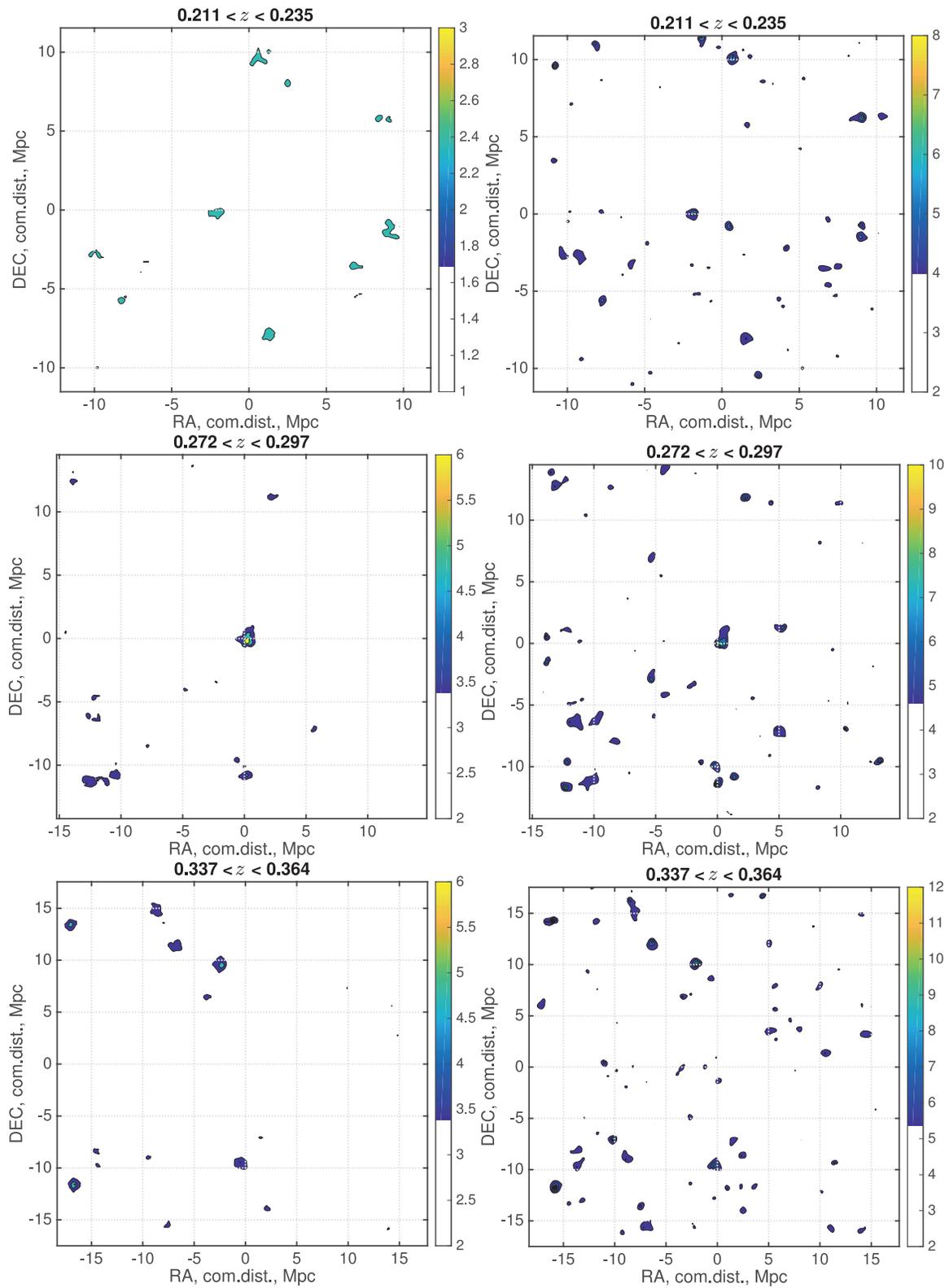


Рис. 10. Продолжение.

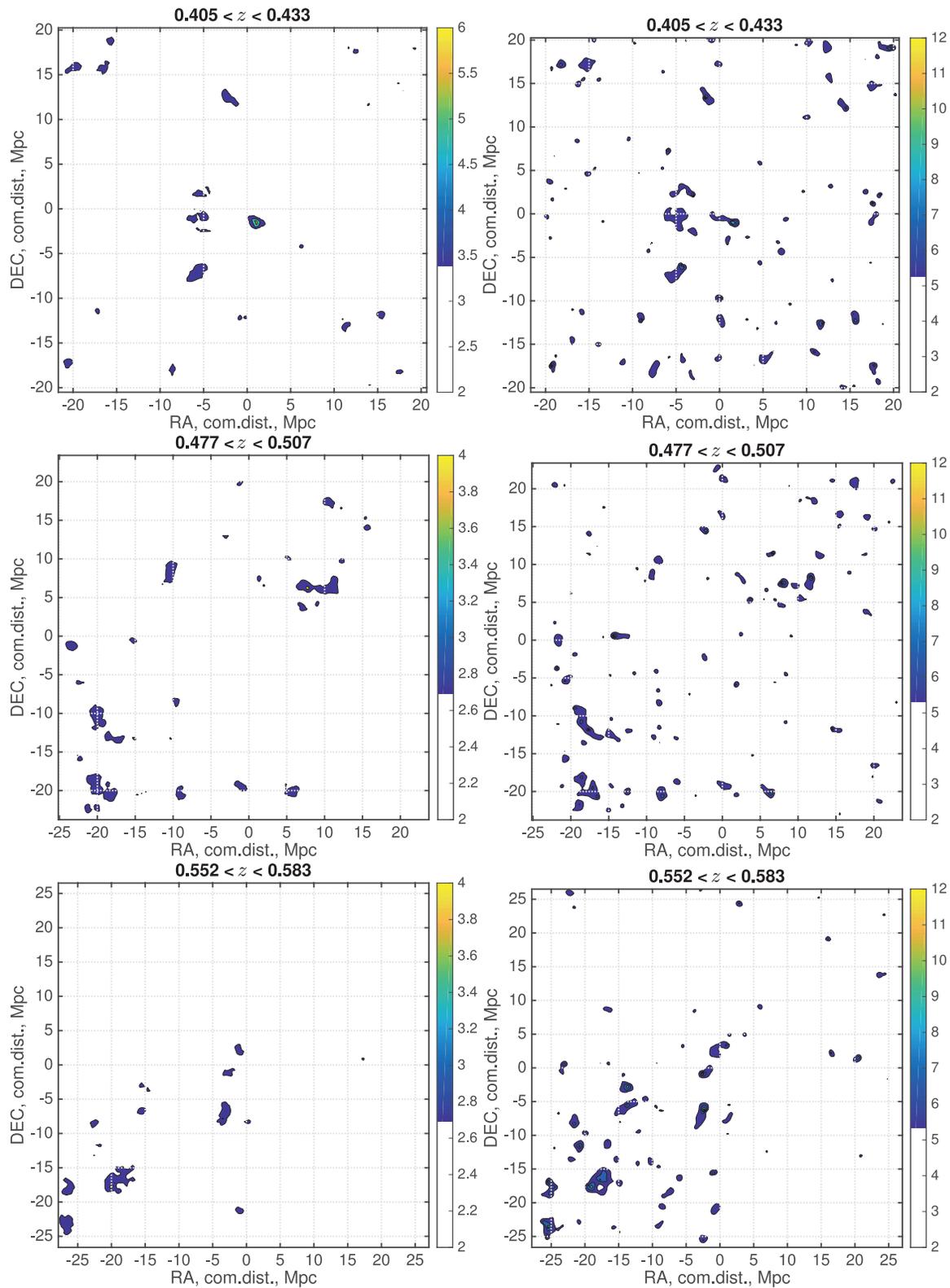


Рис. 10. Продолжение.

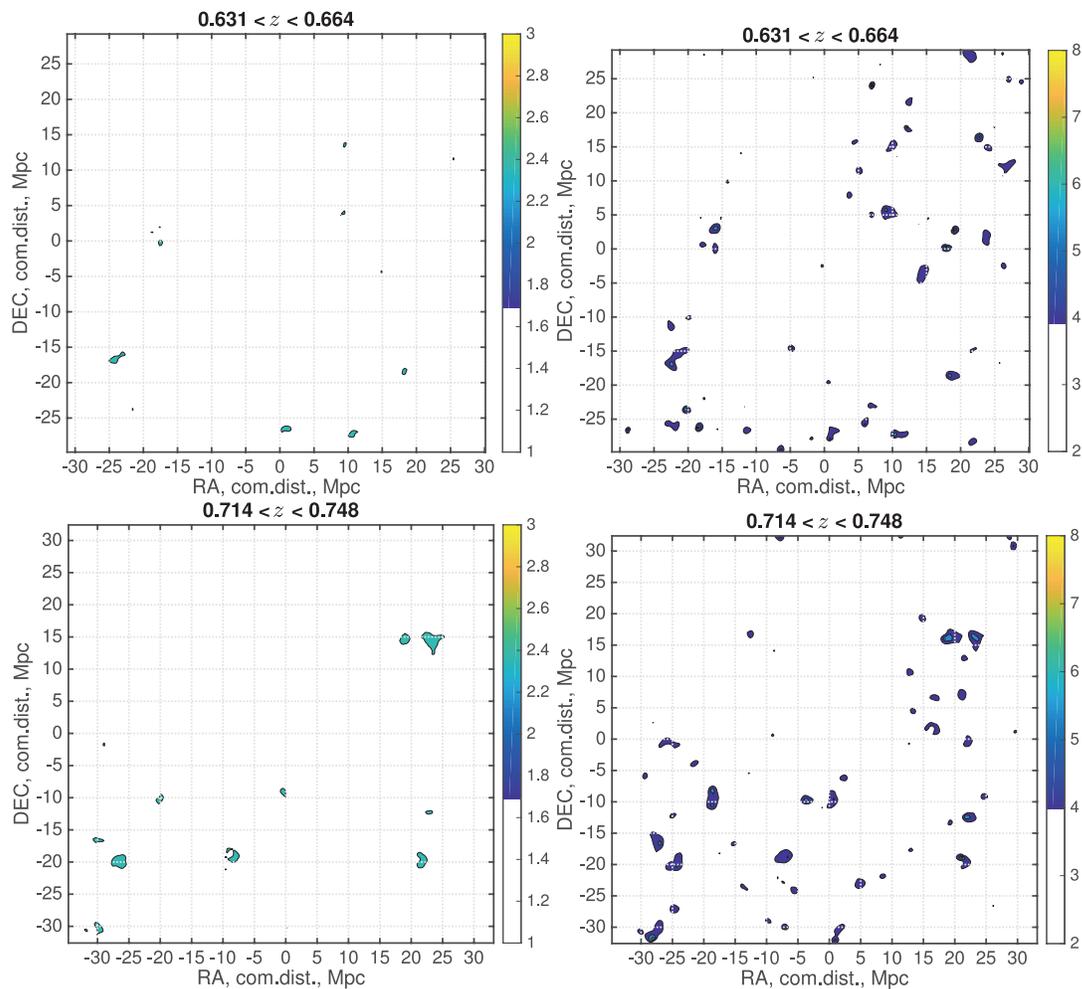


Рис. 10. Окончание.

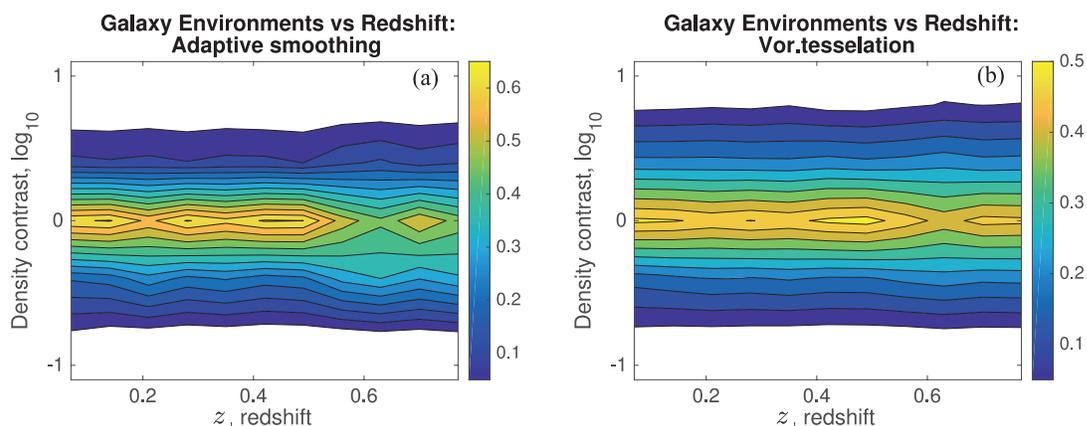


Рис. 11. Контраст плотности, полученный методом с адаптивной апертурой и сглаживанием для 28 398 галактик (а) и методом диаграмм Вороного для 27 446 галактик (б) из фотометрического каталога в диапазоне z от 0 до 0.8. Цветом показаны контуры для относительного числа галактик каждого значения контраста плотности большего, чем 0.05, и каждого интервала по красному смещению. На протяжении всего диапазона красных смещений основная масса галактик находится в областях со средней плотностью окружения в слое.

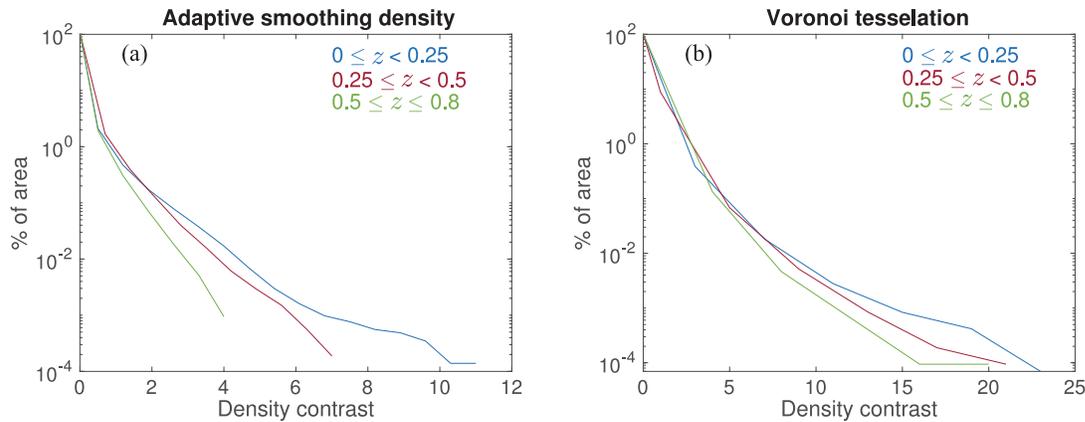


Рис. 12. Процент площади поля в зависимости от значения контраста плотности окружения, для трех диапазонов красного смещения для двух методов восстановления карт контраста плотности: метода с адаптивной апертурой и сглаживанием плотности окружения (а) и методом диаграмм Вороного (б). Различный диапазон по оси контраста плотности окружения вызван различиями в работе алгоритмов.

данный алгоритм выделяет только статистически значимые структуры.

На рис. 12 представлен процент площади поля как функция контраста плотности для трех диапазонов красного смещения ($0 \leq z < 0.25$, $0.25 \leq z < 0.5$, $0.5 \leq z \leq 0.8$) для обоих методов восстановления карт контраста. На графике хорошо видно увеличение диапазона контраста плотностей для высоких красных смещений ($0.5 \leq z \leq 0.8$) по сравнению с наблюдаемыми при низких красных смещениях ($0 \leq z < 0.25$) для обоих методов. Разница в величине диапазонов контрастов плотности для разных методов их определения обусловлена различиями в работе алгоритмов. Этот график аналогичен пространственному спектру мощности, однако он легче в построении. Относительная частота данного контраста плотности при каждом красном смещении более очевидна, чем в случае спектра мощности.

На рис. 13 показаны корреляции типа SED галактики (раздел 3.2) с плотностью окружения и красным смещением. Цветом и типом линии закодировано три диапазона SED-типов галактик:

- 1) красная сплошная линия — галактики ранних типов E–Sa;
- 2) зеленая штриховая линия — галактики поздних типов Sab–Sd;
- 3) синяя штрих-пунктирная линия — неправильные галактики/галактики со вспышкой звездообразования IRR/SB.

Для каждого интервала красного смещения показана доля каждого диапазона типов галактик в зависимости от плотности окружающей среды. На рис. 13а показана относительное число галактик

для всех диапазонов типов для контраста плотностей, полученного методом с адаптивной апертурой и сглаживанием плотности окружения, а рис. 13б — методом диаграмм Вороного.

Многочисленные исследования показали сильную зависимость относительного количества галактик раннего типа от плотности окружающей среды для близких красных смещений (например, Guo et al. 2013; 2014, Madgwick et al. 2003). На рис. 13 и рис. 14 хорошо видно, что галактики раннего типа предпочитают обитать в более плотных средах на всем исследуемом диапазоне красных смещений $0 \leq z \leq 0.8$. Эта зависимость наиболее ярко выражена для контраста плотностей, определенного с помощью метода с адаптивной апертурой и сглаживанием плотности окружения, где доля галактик раннего типа резко возрастает с ростом контраста плотности выделяемой крупномасштабной структуры. Такая форма зависимости для метода с адаптивной апертурой и размытием по сравнению с методом диаграмм Вороного обусловлена тем, что первый выделяет только значимые сгущения плотности. Общий процент галактик раннего типа E–Sa в исследуемой выборке галактик систематически уменьшается с увеличением z .

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были исследованы фотометрические свойства выборки галактик поля NS 47.5-22 (общая площадь поля составляет 2.386 кв. градусов). Наблюдательные данные для фотометрического каталога галактик были получены на 1-м телескопе Шмидта БАО НАН. Общая выборка, соответствующая критериям отбора, состоит из 28 398 галактик. Для выборки были определены спектральные типы галактик и получены фотометрические красные смещения с точностью

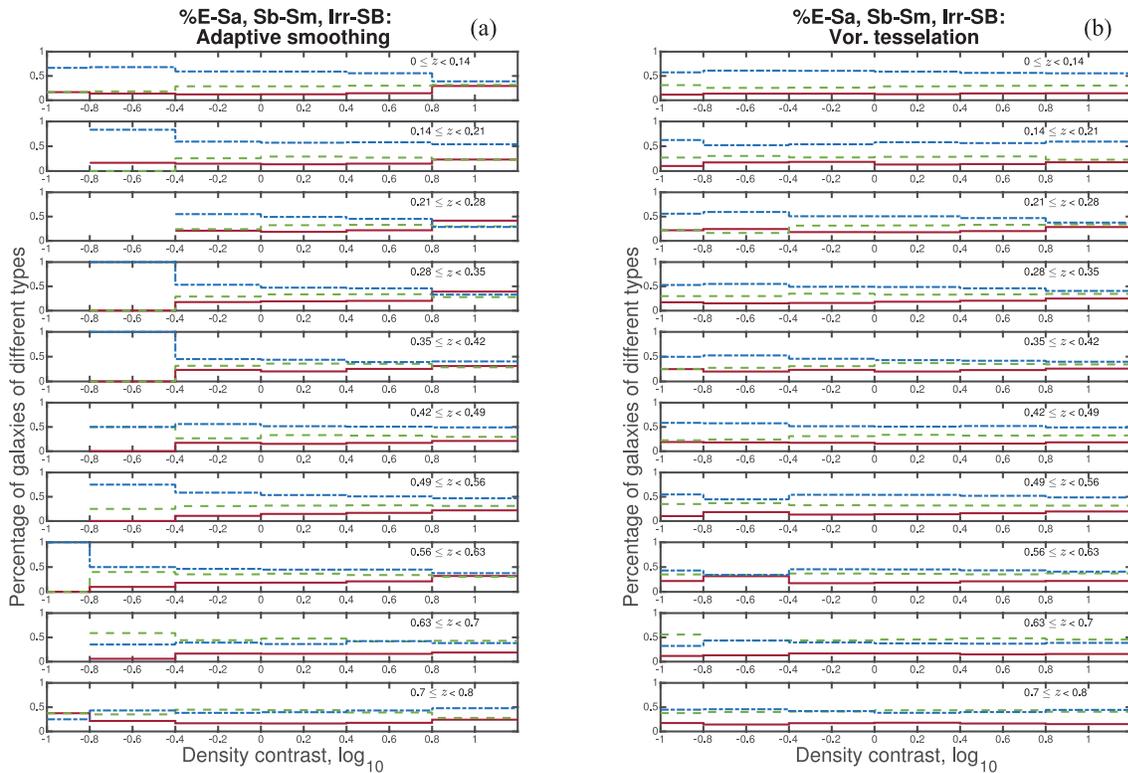


Рис. 13. Относительное число галактик каждого типа (галактики ранних типов E–Sa, галактики поздних типов Sab–Sd и неправильные галактики/галактики со вспышкой звездообразования IRR/SB; классификация проведена на основе соответствия SED) в исследуемой выборке как функция плотности окружающей среды. Полная выборка разбита на 10 интервалов по красному смещению. Красная сплошная линия соответствует относительно количеству галактик типа EE–Sa, зеленая штриховая — Sab–Sd и синяя штрих-пунктирная линия — IRR/SB. Панель (a) показывает соотношение, полученное для метода с адаптивной апертурой и сглаживанием плотности окружения, а (b) — для метода диаграмм Вороного.

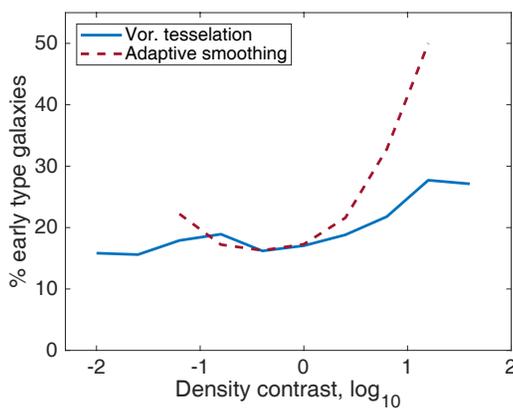


Рис. 14. Относительное число галактик ранних типов (согласно классификации по SED галактик E–Sa) в зависимости от контраста плотности окружения для двух методов восстановления карт контраста плотности: метода с адаптивной апертурой и сглаживанием плотности окружения (красная пунктирная линия) и методом диаграмм Вороного (синяя сплошная линия).

$\sigma_z < 0.01$, которые позволяют определить принадлежность галактики к скоплению или группе.

На основе высокоточных фотометрических красных смещений для выборки из 28 398 галактик в диапазоне красных смещений примерно до 0.8 были получены карты контраста плотности, которые позволили выделить более 250 значимых крупномасштабных сгущений плотности. Полученные структуры обладают разнообразной формой: от практически симметричных круговых до протяженных филаментов. Размеры выделяемых сгущений плотности находятся в диапазоне от 0.5 до 10 Мпк в сопутствующем масштабе.

Качество выделения крупномасштабных сгущений плотности оценено по 44 известным скоплениям галактик в поле HS 47.5–22. Было обнаружено 42 скопления с красными смещениями, хорошо согласующимися в пределах погрешности измерений с данными из работ других авторов.

Карты распределения контраста плотности были построены с помощью двух независимых ме-

тодов в тонких срезах крупномасштабного распределения галактик в диапазоне красных смещений приблизительно до 0.8: метода с адаптивной апертурой и сглаживанием плотности окружения и диаграмм Вороного. Оба метода показывают согласованные результаты, что дает нам уверенность в получаемых результатах.

Кроме того, мы проанализировали зависимость между типами галактик, определенными по SED, и плотностью окружения. Полученные результаты показывают, что галактики ранних типов обычно расположены в более плотных областях вплоть до $z \sim 0.8$, что находится в согласии с более ранними работами (Dressler 1980, Oemler 1974), а также с результатами исследования поля COSMOS (Scoville et al. 2013). Полный набор карт распределения контраста плотности в 57 тонких слоях по красному смещению, а также анимация слоев доступны на <https://github.com/ale-gro/densitymaps>.

БЛАГОДАРНОСТИ

The NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) поддерживается Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology в рамках контракта с National Aeronautics and Space Administration.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Методическая часть работы — наблюдения, разработка методов обработки и калибровки данных — проводилась при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 17-12-01335 «Ионизованный газ в галактических дисках и за пределами оптического радиуса». Анализ полученного материала и исследование крупномасштабной структуры выполнены в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Bertin and S. Arnouts, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **117**, 393 (1996).
2. A. L. Coil, J. F. Hennawi, J. A. Newman, et al., *Astrophys. J.* **654** (1), 115 (2007).
3. M. C. Cooper, J. A. Newman, D. J. Croton, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **370** (1), 198 (2006).
4. S. N. Dodonov and I. V. Chilingarian, *Astrophysical Bulletin* **63**, 1 (2008).
5. A. Dressler, *Astrophys. J.* **236**, 351 (1980).
6. R. Feldmann, C. M. Carollo, C. Porciani, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372**, 565 (2006).
7. B. F. Gerke, J. A. Newman, M. Davis, et al., *Astrophys. J.* **625** (1), 6 (2005).
8. A. Grokhovskaya and S. N. Dodonov, *Astrophysical Bulletin* **74**, 379 (2019).
9. H. Guo, I. Zehavi, Z. Zheng, et al., *Astrophys. J.* **767**, 1 (2013).
10. H. Guo, Z. Zheng, I. Zehavi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **441**, 2398 (2014).
11. J. Hao, T. A. McKay, B. P. Koester, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **191**, 254 (1999).
12. B. P. Holden, R. C. Nichol, A. K. Romer, et al., *Astron. J.* **118**, 2002 (1999).
13. O. Ilbert, M. Salvato, P. Capak, et al., *ASP Conf. Ser.* **399**, 169 (2008).
14. G. Kauffmann, S. D. M. White, T. M. Heckman, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **353**, 713 (2004).
15. B. P. Koester, T. A. McKay, J. Annis, et al., *Astron. J.* **660**, 239 (2007).
16. O. Le Fèvre, L. Guzzo, B. Meneux, et al., *Astron. and Astrophys.* **439** (3), 877 (2005).
17. S. J. Lilly, O. L. Fevre, A. Renzini, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **172** (1), 70 (2007).
18. F. J. Lockman, K. Jahoda, and D. McCammon, *Astrophys. J.* **302**, 432 (1986).
19. E. Madgwick, D. Sand Hawkins, O. Lahav, S. Maddox, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **344**, 847 (2003).
20. A. W. McConnachie, D. R. Patton, S. L. Ellison, and L. Simard, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **365**, 255 (2009).
21. B. Meneux, O. Le Fèvre, L. Guzzo, et al., *Astron. and Astrophys.* **452** (2), 387 (2006).
22. M. Moles, N. Benítez, J. A. Aguerra, et al., *Astron. J.* **136** (3), 1325 (2008).
23. K. Molhagen, H. J. Wendker, and U. G. Briel, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **126**, 509 (1997).
24. T. Murayama, Y. Taniguchi, N. Z. Scoville, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **172**, 523 (2007).
25. A. Oemler, PhD Thesis, (California Institute of Technology, Pasadena, 1974).
26. Y. J. Peng, S. J. Lilly, K. Kovač, et al., *Astrophys. J.* **721** (1), 193 (2010).
27. M. Postman, L. M. Lubin, J. E. Gunn, et al., *Astron. J.* **111**, 165 (1996).
28. N. Scoville, S. Arnouts, H. Aussel, et al., *Astrophys. J. Supplement* **206**, 26pp (2013).
29. A. G. Smith, A. M. Hopkins, R. W. Hunstead, and K. A. Pimblet, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **422**, 25 (2012).
30. Z. L. Wen and J. L. Han, *Astrophys. J. Suppl.* **183**, 197 (2009).
31. C. Wolf, K. Meisenheimer, M. Kleinheinrich, et al., *Astron. and Astrophys.* **421** (3), 913 (2004).

Methods for analyzing the large-scale distribution of galaxies

A. A. Grokhovskaya, S. N. Dodonov, and T. A. Movsesyan

We present results of the study of the large scale distribution of galaxies up to $z \sim 0.8$ in the field HS 47.5-22 based on the photometric data obtained with the 1-m Schmidt telescope of the Byurakan astrophysical observatory (BAO NAS). The complete sample includes 28 398 galaxies brighter than $m_{AB} = 23^m$ up to $z \sim 0.8$. Clusterings of density in the large scale distribution of galaxies was conducted using two independent methods of determining the density contrast maps in 57 narrow layers of the three-dimensional large scale distribution of galaxies: the algorithm with the adaptive kernel and smoothing of the environment density and the Voronoi tessellation. We determined more than 250 significant large scale overdensities. The results obtained demonstrate the wide range of structures from 0.5 Mpc to 10 Mpc (the comoving size) in the full interval of redshifts up to $z \sim 0.8$.

Keywords: galaxies: clusters: general—galaxies: statistics