

Крупномасштабное распределение галактик поля HS 47.5 - 22. II Анализ наблюдательных данных

А. А. Гроховская,^{1,*} С. Н. Додонов,^{1,**} Т. А. Мовсисян²

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Бюраканская астрофизическая обсерватория НАНА, Бюракан, 0213 Армения

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 сгущений плотности. Полученные результаты демонстрируют широкий диапазон структур от 0.5 Мпк до 10 Мпк (сопутствующий размер) на полном интервале красных смещений до $z \sim 0.8$.

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 [1, 2]. 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_α и величину скачка D4000 Å [3], темп звездообразования для галактик на близких красных смещениях [4]. В работах, основанных на об-

зорах 2dFGRS [2dF Galaxy Redshift Survey, 5] и SDSS [Sloan Digital Sky Survey, 6, 7], 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.

Использование спектроскопических красных смещений наиболее предпочтительно для анализа крупномасштабного распределения галактик и зависимости их физических свойств от плотности окружения. Спектроскопические красные смещения широко применялись в исследованиях на малых z с относительно яркими галактиками (например, в [4]). Однако для выборок десятков и сотен тысяч галактик с большими красными смещениями слабее, чем $I_{AB} = 22^m$, и не имею-

* Electronic address: grohovskaya.a@gmail.com

** Electronic address: dodo@sao.ru

щих сильных линий излучения это практически невозможно. Спектроскопия таких слабых галактик требует самых больших телескопов и времени экспозиции в несколько часов [8–13]. 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, 14], ALHAMBRA [Advanced Large, Homogeneous Area Medium Band Redshift Astronomical Survey, 15], COSMOS [Cosmic Evolution Survey, 16]. Часть из этих обзоров несмотря на значимую суммарную площадь (для COMBO-17 - 0.78 кв. градуса, для ALHAMBRA - 2.79 кв. градуса), выполнена на площадках небольшого размера, значительно разнесенных в пространстве, что не позволяет в полной мере восстанавливать крупномасштабное распределение галактик. Широкополосные обзоры в виду низкой точности определения фотометрических красных смещений и классификации по типам галактик исключаются из рассмотрения. Спектральные обзоры достаточной площади ([Sloan Digital Sky Survey, 4], 2dFGRS), ограничены по глубине, а глубокие спектральные обзоры имеют недостаточную площадь и выборки объектов не полны в связи с необходимостью предвари-

тельной селекции объектов.

Наиболее успешный обзор COSMOS, имеет общую площадь 1.95 deg^2 [16] и представляет собой единую площадку (координаты центра $10^h00^m28.60^s + 02^d12^m21.0^s$), однородно покрытую наблюдениями в 30 фильтрах. Кроме того, для почти 20000 галактик в этом поле получена спектральная информация. На основе этих данных в работе [17] 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 HS47.5 - 22 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 ис-

пользованы 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 $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1}$.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения проводились на 1-м телескопе Шмидта Бюраканской астрофизической обсерватории на протяжении нескольких сетов в феврале, марте, апреле и ноябре 2018 года и в феврале и ноябре 2019. Для наблюдений было выбрано поле HS 47.5-22 (с координатами центра $09^h50^m00^s + 47^d35^m00^s$) - одно из полей с глубоким накоплением рентгеновского спутника ROSAT [18]. Суммарное время экспозиции > 5000 сек. для 73% площади и более 20000 сек. для центральной области размером 2.3 deg^2 . Предельный поток в $3.4 * 10^{-14} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 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 $\langle N_H \rangle = 10^{20} \text{ cm}^{-2}$, что не намного выше значения поглощения в области "дыры Локмана"[19], где наблюдается самое низкое поглощение на луче зрения для северного неба

$$\langle N_H \rangle = 4.5 * 10^{19} \text{ cm}^{-2}.$$

Для поля HS47.5-22 были проведены наблюдения в 4 широкополосных фильтрах (u, g, r, i SDSS) и 16 средне-полосных фильтрах (FWHM=250 Å, с равномерным покрытием спектрального диапазона 4000 - 8000 Å) до $R_{AB} = 23^m$ (см. Табл. 1, Рис.1). Центральная часть поля, размером 2.386 deg^2 , была покрыта четырьмя наборами экспозиций в широкополосных и среднеполосных фильтрах. Перекрытия соседних наборов составляли около 10 arcmin. Суммарное время экспозиции подбиралось таким образом, чтобы достичь глубины $m_{AB} \approx 25^m$ с соотношением сигнал-шум ~ 5 в широкополосных (около 2 часов) и $m_{AB} \approx 23^m$ с соотношением сигнал-шум ~ 5 в среднеполосных фильтрах (около 60 мин в пике кривой чувствительности детектора и около 2 часов на краях диапазона).

3. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ КРАСНЫЕ СМЕЩЕНИЯ И ВЫБОРКА ГАЛАКТИК

Выборка галактик поля HS47.5-22 построена на основе глубоких ($m_{AB} \approx 25^m$) снимков в широкополосных фильтрах системы SDSS (g, r и i) и ограничена предельной звездной величиной $m_{AB} \approx 23^m$, до которой получены снимки в среднеполосных фильтрах с отношением сигнал/шум ~ 5 . Общее число галактик поля около 100 000, в выборку галактик, предназначенную для изучения, вошли 28 398 галактик

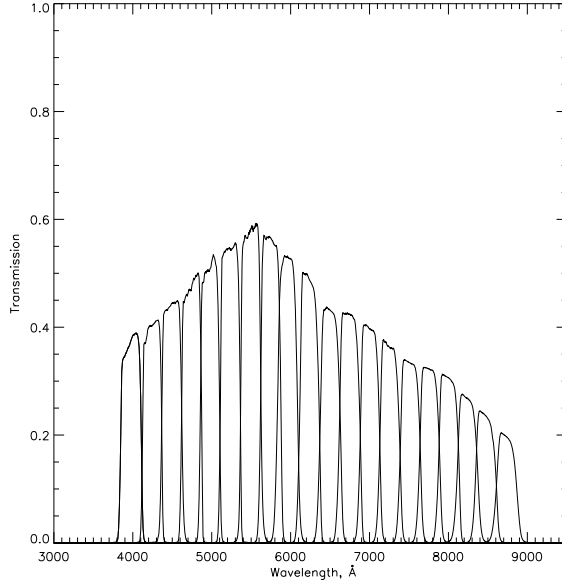


Рис. 1. Набор фильтров 1-м телескопа Шмидта БАО НАН. Пропускание фильтров измерено в $F / 2$ с учетом спектральной чувствительности CCD-детектора.

удовлетворяющим критериям отбора (см. Раздел 3.1).

Фотометрические свойства выборки галактик поля HS 47.5-22 были исследованы в диапазоне 4000 Å до 8000 Å , что позволяет уверенно определять красные смещения галактик от $z = 0$ до $z = 0.8$. Фотометрия галактик выполнена с помощью программы SExtractor [20] 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 описана в [21]).

По результатам фотометрии в 17 фильтрах (u_SDSS и 16 среднеполосных фильтров)

Таблица 1. Набор фильтров 1-м телескопа Шмидта БАО НАН. Эффективная длина волны, FWHM, Предельная звездная величина, измеренная на уровне сигнал/шум ~ 5 .

Фильтр	$\lambda_{\text{сеп}}, \text{Å}$	FWHM, Å	$m_{\text{lim}, 5\sigma}$
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

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

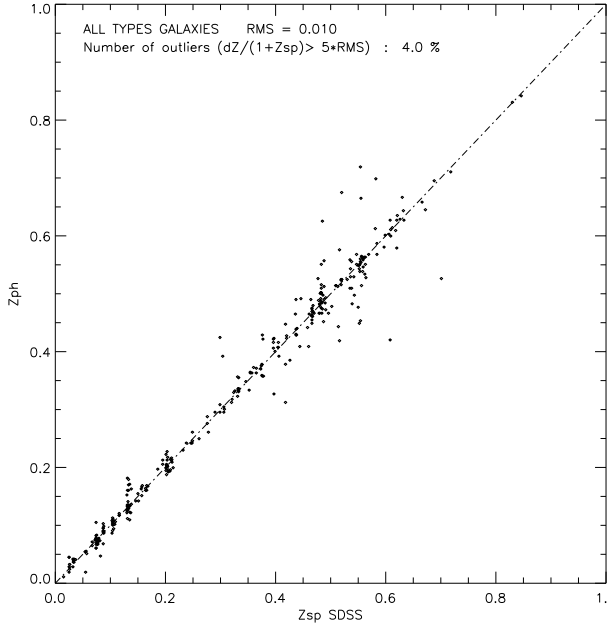


Рис. 2. Сравнение фотометрических красных смещений галактик z_{ph} , полученных с помощью программы ZEBRA режиме Maximum Likelihood [22] со спектроскопическими красными смещениями галактик z_{sp} , взятыми из SDSS [6, 7] с распределением ошибок $\Delta z/(1+z)$ для 473 галактик с известными спектроскопическими красными смещениями. Точность определения фотометрического красного смещения $\sigma_z < 0.01$, процент выбросов $\Delta z/(1+z) > 5 \cdot \sigma_z \sim 4.0\%$.

основан на соответствии спектрального шаблона галактики наблюдаемому распределению энергии. В качестве опорных спектров для определения фотометрических красных смещений использованы спектры из работы [23] и пакет программ ZEBRA [Zurich's Extragalactic Bayesian Redshift Analyzer, 22].

Точность определения фотометрических красных смещений всех типов галактик составила $\sigma_z < 0.01$, а процент выбросов $(\Delta z/(1+z) > 5 \cdot \sigma_z) \sim 4.0\%$ (Рис. 2). Точность σ_z варьируется от 0.01 для объектов со звездной ве-

личной $16^m - 21^m$ в фильтре r_SDSS до 0.03 для $21^m - 23^m$. Ошибки в определении типа галактики не превышают $\sim 3.0\%$ 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 100000 объектов) по следующим критериям:

1. $0 < z \leq 0.8$;
2. Объекты ярче $R_{AB} = 23^m$;
3. Индекс протяженности < 0.8 для объектов ярче $R_{AB} = 21^m$, индекс протяженности < 0.9 для объектов ярче $21^m < R_{AB} < 22^m$ and индекс протяженности < 0.96 для объектов ярче $R_{AB} < 23^m$ [20];
4. Степень искажения фотометрии ≤ 2 [20].

Применив эти четыре критерия к первоначальной выборке из более чем 100000 объектов, мы получили выборку из 28 398 галактик, которая полностью удовлетворяет заданным условиям. На рисунке 3 приведено распределение галактик в зависимости от красного смещения, а также сравнение с аналогичной выборкой галактик каталога COSMOS [17].

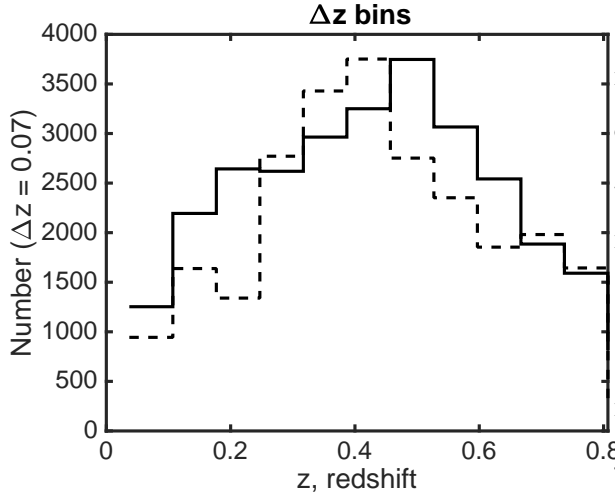


Рис. 3. Распределение количества галактик как функция красного смещения для всех типов галактик для выборки, используемой в этой работе (сплошная линия), и выборки из работы COSMOS (пунктирная линия) [17] показаны для принятых критериев отбора ($R_{AB} < 23$ mag при $0 < z \leq 0.8$). Ширина интервалов по красному смещению $\Delta z = 0.07$.

3.2. Классификация галактик

Определение спектральных типов галактик выполнено с помощью программы ZEBRA [22] и опорных спектров для определения спектрального типа галактик из работы [23]. 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 [24].

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.

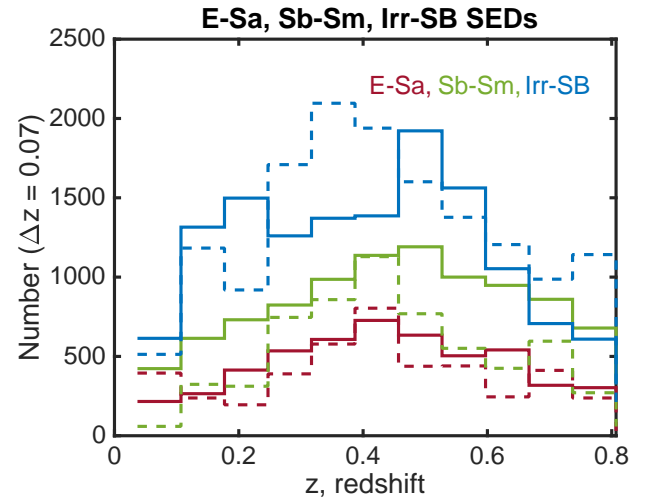


Рис. 4. Распределение количества галактик как функция красного смещения, разделенная для трех групп галактик для выборки, используемой в этой работе (сплошные линии), и выборки из работы COSMOS (пунктирные линии) [17] показаны для принятых критериев отбора ($R_{AB} < 23$ mag при $0 < z \leq 0.8$). Ширина интервалов по красному смещению $\Delta z = 0.07$.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ВОКРУГ ГАЛАКТИК

Плотность окружения для каждой галактики была получена из локальной поверхностной 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 [25].

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 плотности окружения и двумерные диаграммы Вороного [25].

Для диаграмм Вороного каждая галактика находится на фотометрическом красном смещении, определенным пакетом программ ZEBRA [22] 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 [25] (Рис.

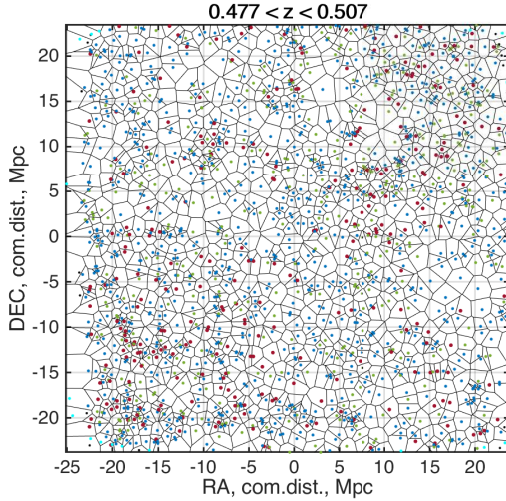


Рис. 5. Диаграммы Вороного, построенные для слоя $0.477 \leq z \leq 0.507$. Области Вороного в двухмерном пространстве показывают области, каждая точка которой находится ближе к отдельной галактике из выборки, чем к любой другой. На диаграмме отдельные галактики показаны красными, зелеными или синими 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.

6).

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 не определяется точно, а обладает некой погрешностью. Поэтому при вы-

делении крупномасштабных структур вначале рассчитывалась плотность окружения по формулам, описанным в [25]. 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 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 HS47.5-22. Полный список из 44 скоплений поля приведен в Табл. 2, из них было обнаружено 42 скопления. Все восстановленные скопления и группы галактик, обнаруживаются в пределах погрешности определения их красного смещения δ_z , которая определяется как половина ширины тонкого слоя по красному смещению, (Рис. 9). Нами не обнаружены два скопления

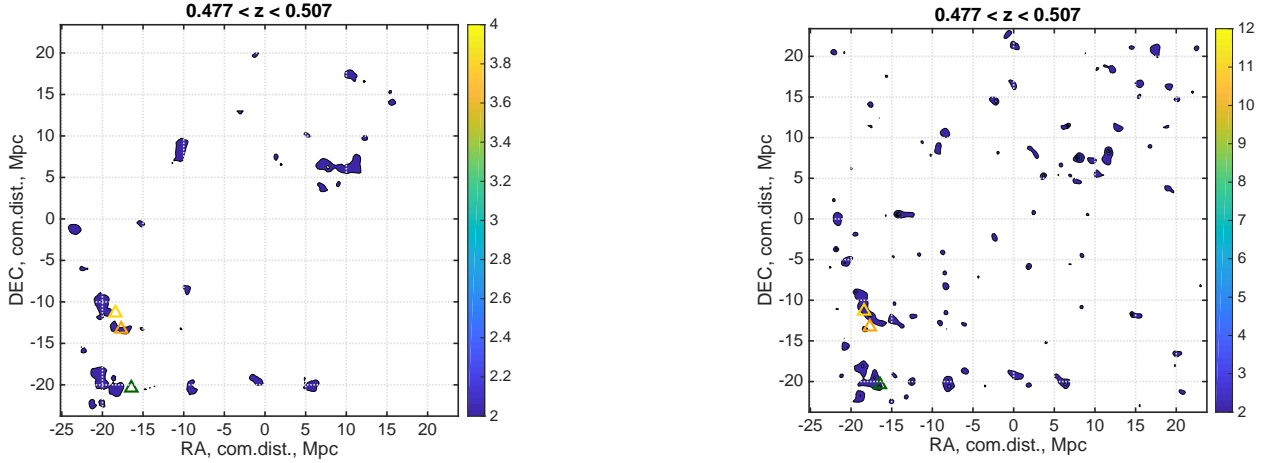


Рис. 6. Карты контраста плотности, построенные для слоя $0.477 \leq z \leq 0.507$ методом адаптивной апертуры со сглаживанием плотности окружения (слева) и методом диаграмм Вороного (справа). Цветовой бар показывает во сколько раз превышена плотность окружения по сравнению со средней плотностью в слое.

Треугольниками отмечены центры скоплений WHL J094637.9+471440 (желтый), WHL J094645.7+471107 (оранжевый), WHL J094659.9+465810 (зеленый) из каталога [26], 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.

галактик: PDCS 043 ($z_{\text{phot}} = 0.200$) и WHL J094840.1+475045 ($z_{\text{spec}} = 0.393$). В комментариях авторы работы [27] 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 $z_{\text{spec}} = 0.396$ и $z_{\text{spec}} = 0.399$, и в пределах радиуса 1 Мпк обнаруживаются только две галактики с $z_{\text{phot}} = 0.393 \pm 0.015$, (Рис. 8). Видимо, скопление галактик выделено авторами [26] 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 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).

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 Во-

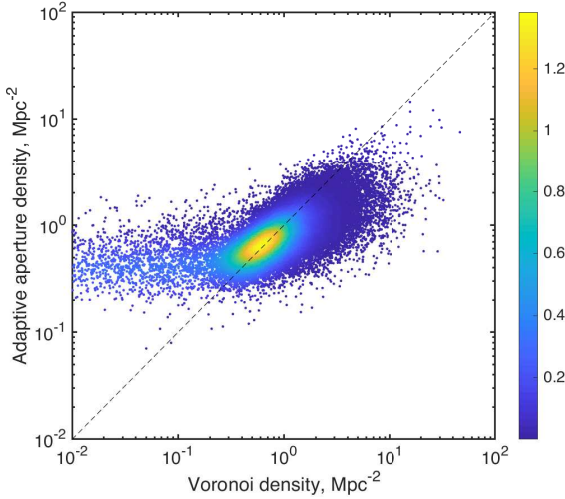


Рис. 7. Сравнение поверхностной плотности окружения для каждой галактики, полученной с помощью алгоритма Вороного и плотности, полученной алгоритмом с адаптивной апертурой и сглаживанием плотности окружения. Цветом обозначена плотность вероятности для каждой галактики. На протяжении трех порядков значений 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.

роного к построению карт контраста плотности сильно разнятся, они показывают 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 галак-

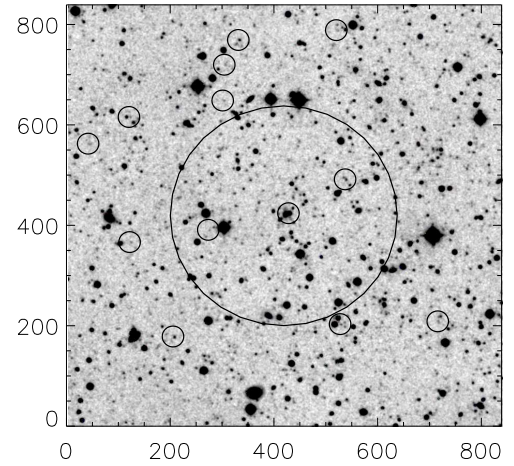


Рис. 8. Карта окрестностей (15*15 arcmin) скопления WHL J094840.1+475045. Маленькими кружками показаны галактики с $z_{\text{phot}} = 0.393 \pm 0.015$, радиус круга большого диаметра равен 1 Мпк.

тик 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. [25]) и обнаруживают только значимые крупномасштабные сгущения плотности. Метод диаграмм Вороного восстанавливает более зашумленную восстановленную выборку сгущений плотности, при этом детализация карт контраста плотности, полученных данным методом, выше, чем для

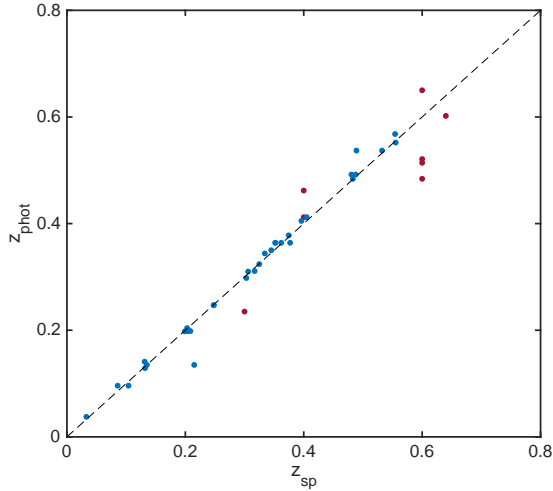


Рис. 9. Сравнение фотометрических красных смещений скоплений галактик z_{ph} , полученных с помощью методов диаграмм Вороного и алгоритма с адаптивной апертурой и сглаживанием, со спектроскопическими красными смещениями галактик z_{sp} , взятыми из работ [26–33] с распределением ошибок $\Delta z/(1+z)$ для 42 скоплений галактик с известными спектроскопическими (синие точки) и фотометрическими (красные точки) красными смещениями. Разброс значений при определении фотометрического красного смещения скоплений $\delta_z < 0.017$.

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 [GitHub](#).

5. КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА ПОЛЯ HS 47.5 - 22

Рис.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. 6 (справа) 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. 6 (слева) 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 удлинённых филаментов.

Большие выборки галактик, доступные из каталогов фотометрических красных смещений, позволяют картировать структуры даже при относительно низких плотностях. Нами

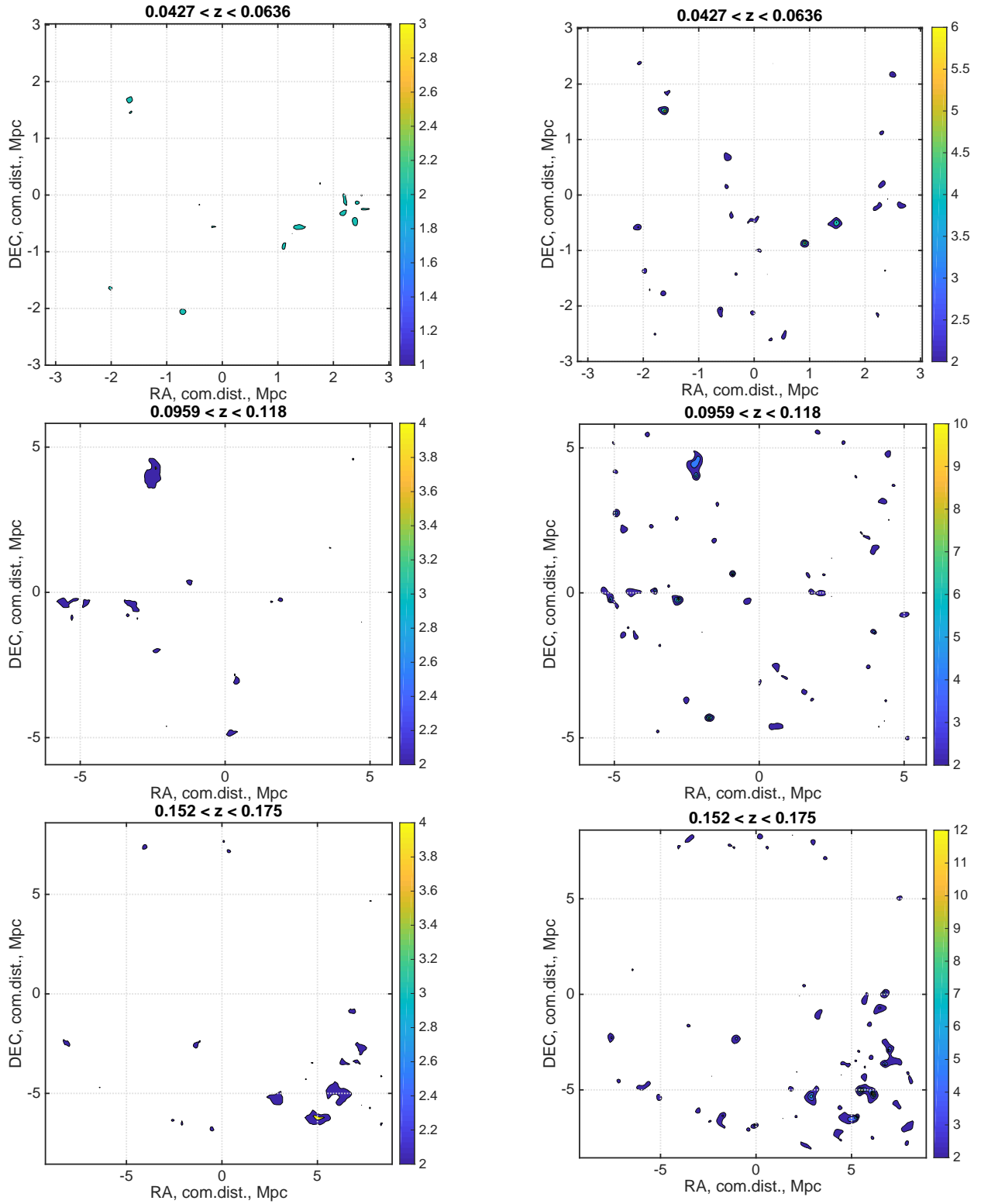


Рис. 10. Карты контраста плотности, построенные для каждого пятого слоя методом диаграмм Вороного (справа) и методом адаптивной апертуры со сглаживанием плотности окружения (слева). Цветовой бар показывает во сколько раз превышена плотность окружения по сравнению со средней плотностью в слое. В качестве 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/density_maps.

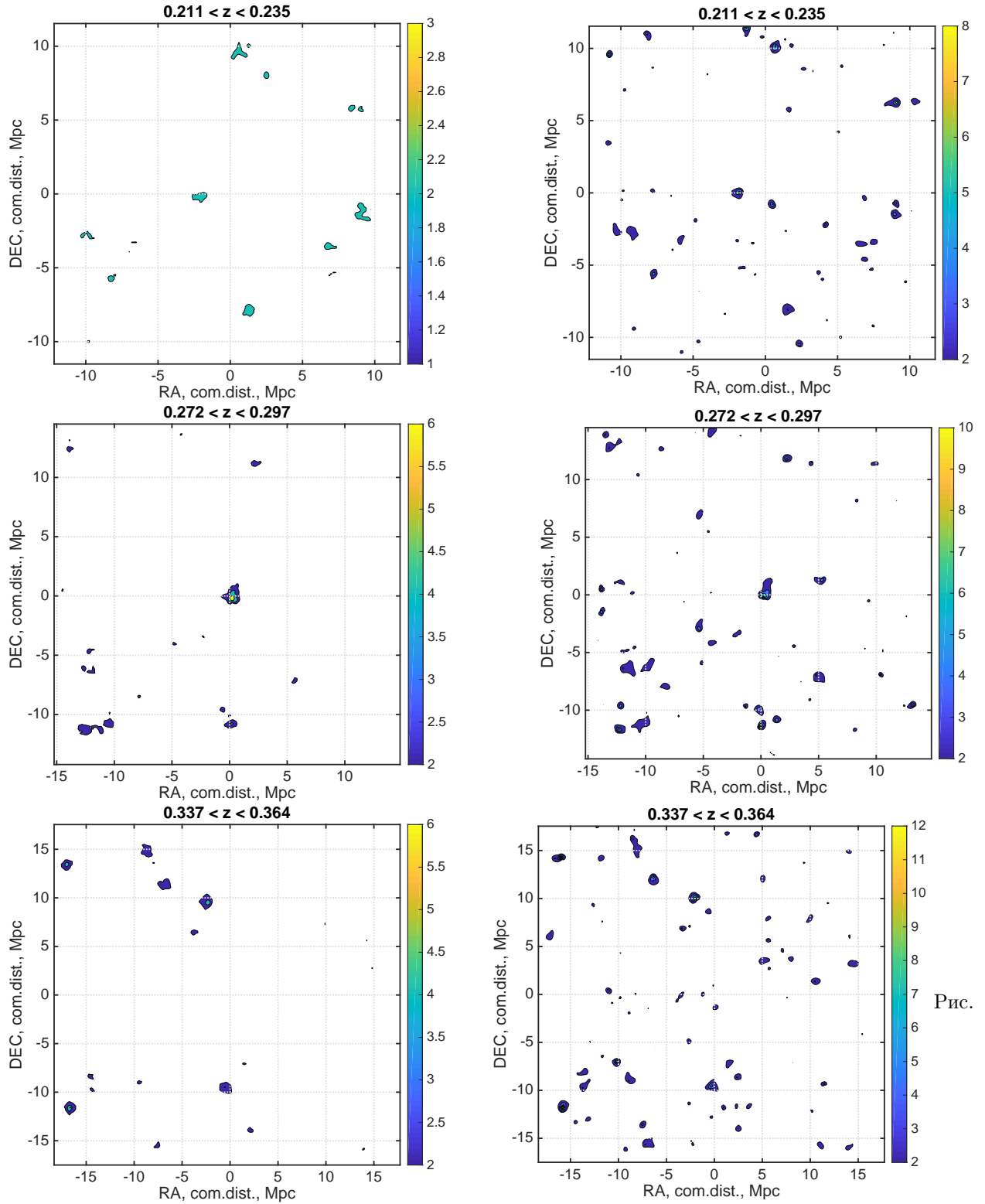


Рис. 10. Продолжение.

были обнаружено более 200 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 [34].

На Рис.11 показан полный диапазон значе-

Рис.

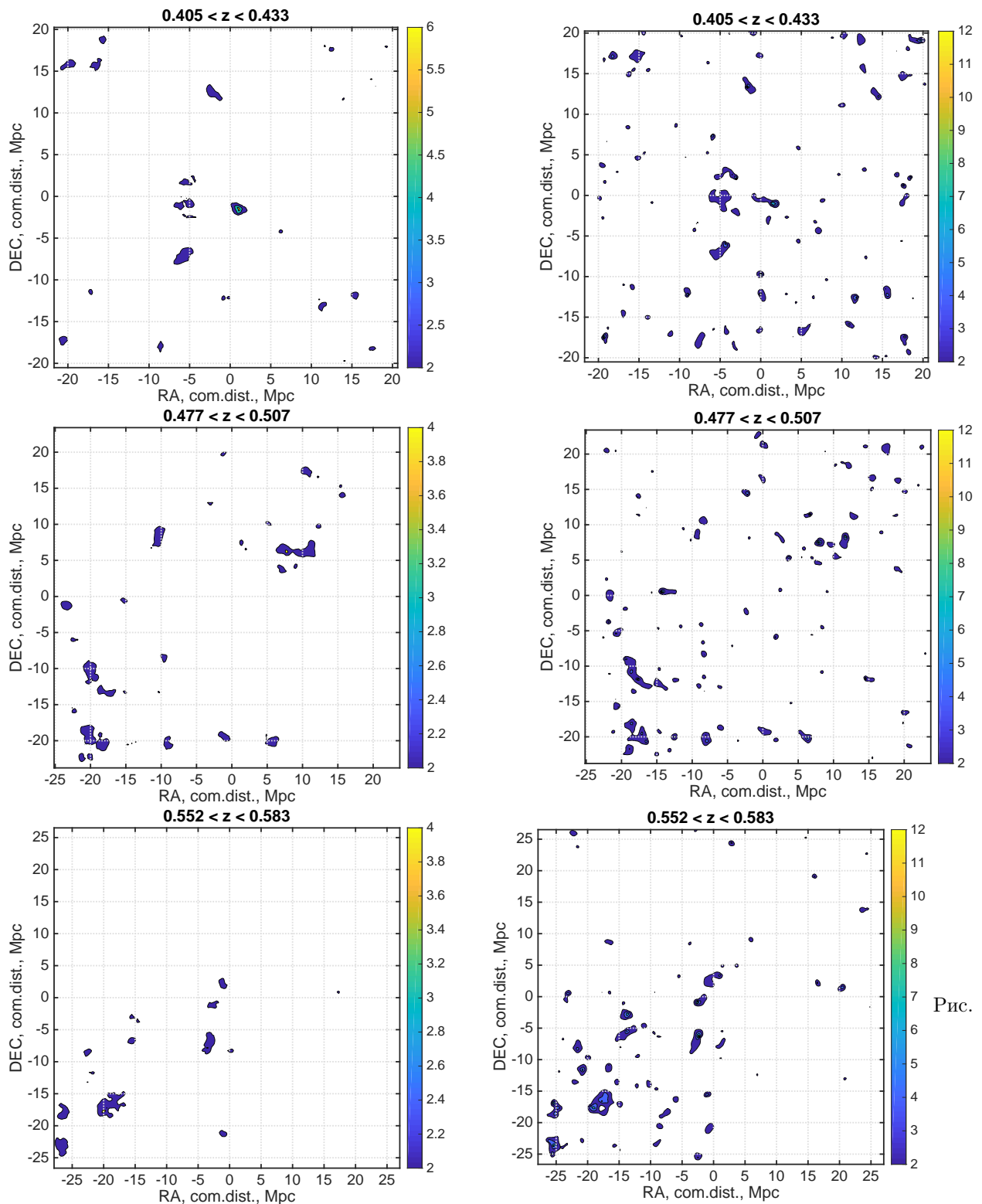


Рис. 10. Продолжение.

ний контраста плотности для окружения галактик из исследуемой выборки в зависимости от красного смещения. Контурами показано

относительное количество галактик как функция контраста плотности окружающей среды и красного смещения. В целом, между зна-

Рис.

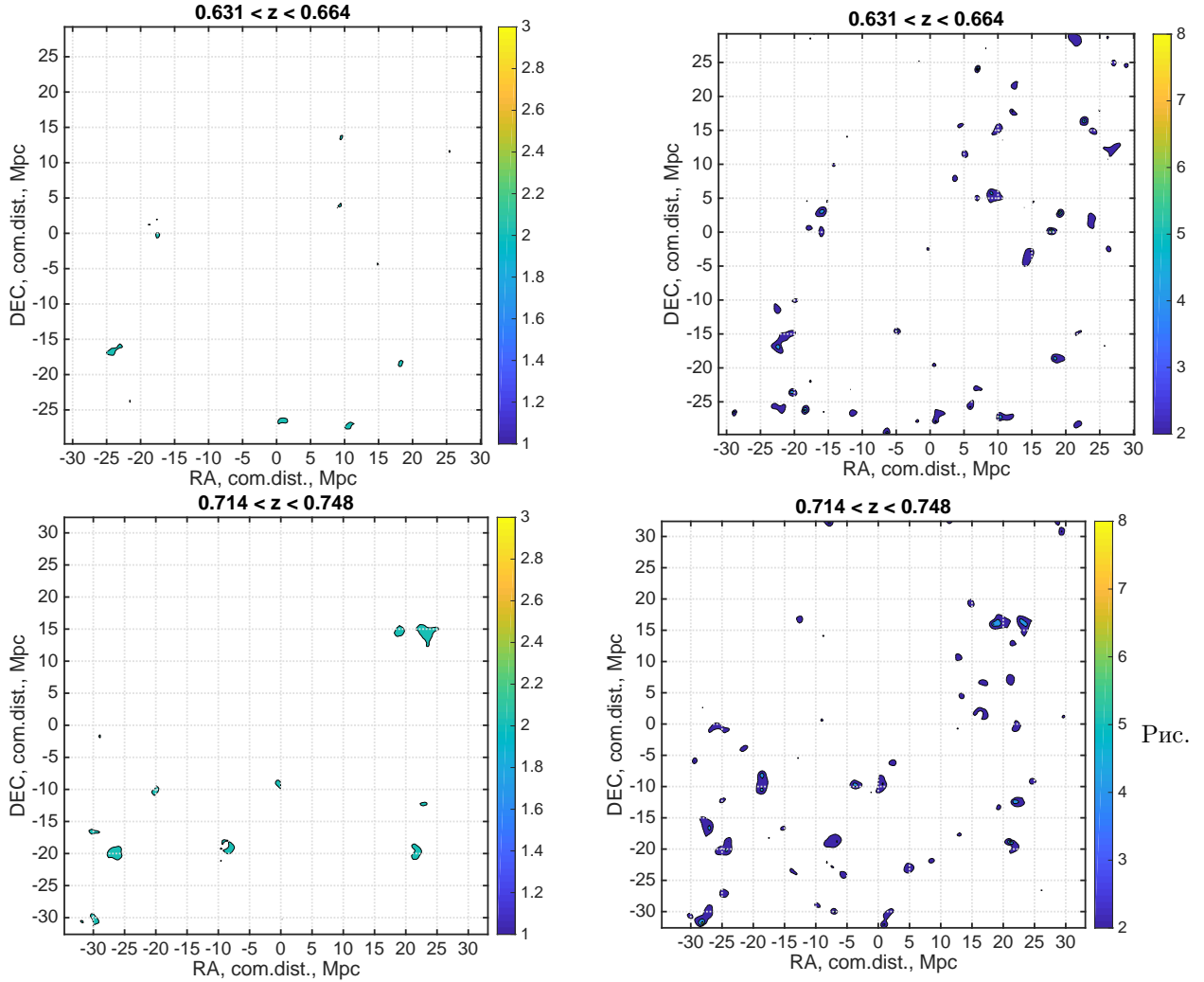


Рис. 10. Окончание.

чениями, 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 данный алгоритм выде-

ляет 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

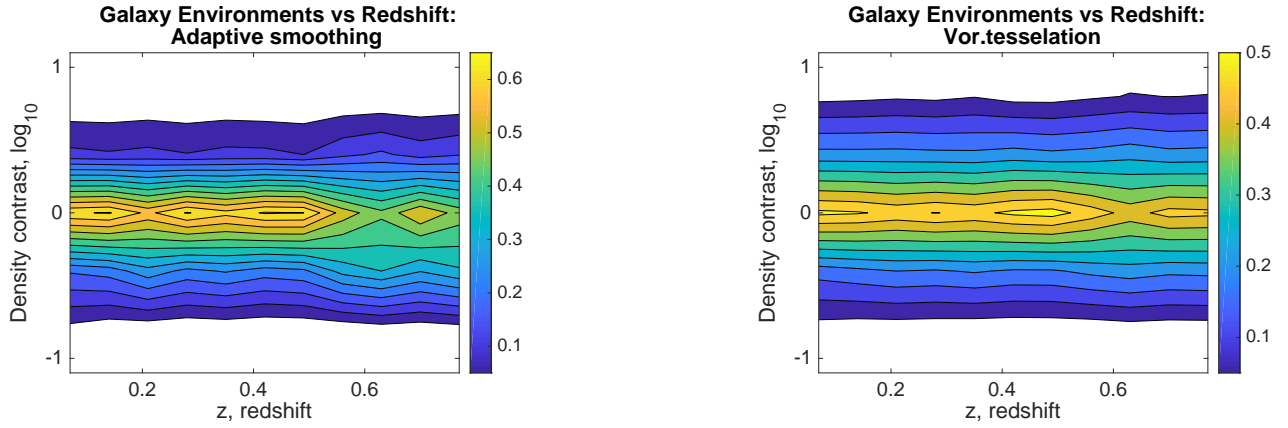


Рис. 11. Контраст плотности, полученный методом с адаптивной апертурой и сглаживанием для 28 398 галактик (слева) и методом диаграмм Вороного для 27 446 галактик (справа) из фотометрического каталога в диапазоне красного смещения от 0 до 0.8. Цветом показаны контуры для относительного числа галактик 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.

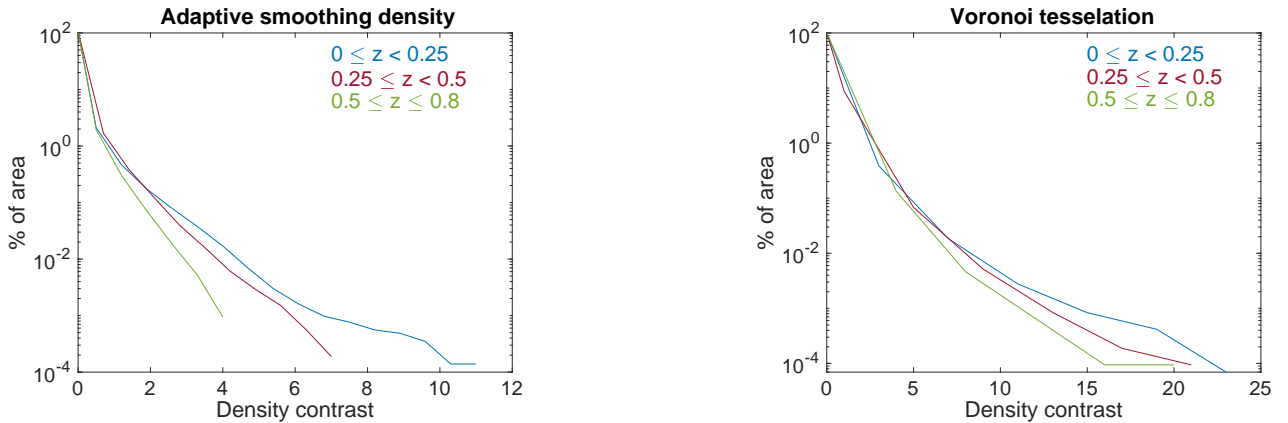


Рис. 12. Показан процент площади поля в зависимости от значения контраста плотности окружения, для трех диапазонов красного смещения для двух методов восстановления карт контраста плотности: метода с адаптивной апертурой и сглаживанием плотности окружения (слева) и методом диаграмм Вороного (справа).

Различный диапазон по оси контраста плотности окружения вызван различиями в работе алгоритмов

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 контра-

ста 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 закодиро-

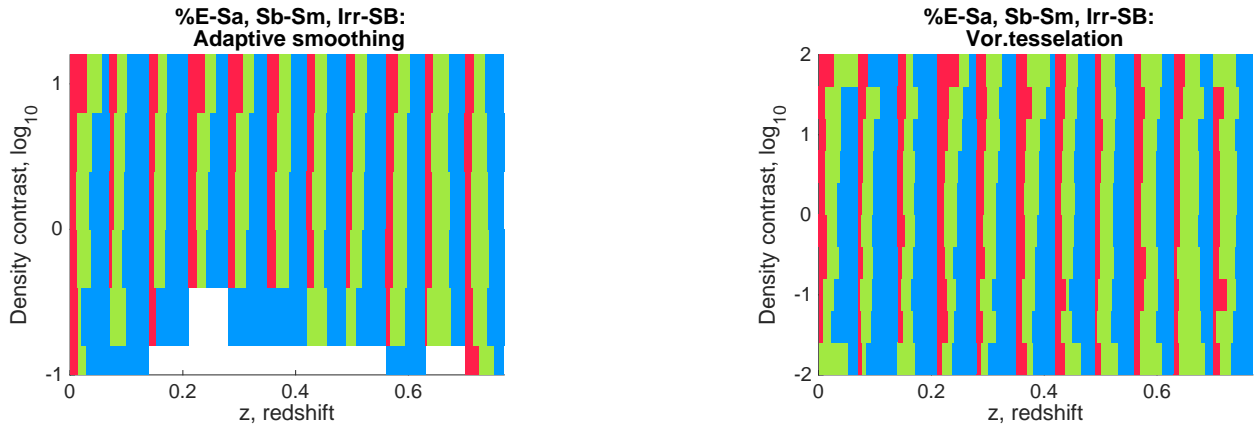


Рис. 13. На рисунке представлено относительное число галактик каждого типа (галактики ранних типов E-Sa, галактики поздних типов Sab-Sd и неправильные галактики/галактики со вспышкой звездообразования IRR/SB; классификация проведена на основе соответствия SED) в исследуемой выборке как функция плотности окружающей среды и красные смещения. Красным цветом показано относительное количество галактик типа E-Sa, зеленым - Sab-Sd и синим - IRR/SB. Относительный размер каждой ячейки, занятый каждым цветом, соответствует процентному содержанию галактик каждого диапазона типов-SED в каждом интервале контраста плотности и красного смещения. Левая панель показывает соотношение, полученное для метода с адаптивной апертурой и сглаживанием плотности окружения, а правая панель - для метода диаграмм Вороного.

вано три диапазона SED-типов галактик:

- Красный - галактики ранних типов E-Sa;
- Зеленый - галактики поздних типов Sab-Sd;
- Синий - неправильные галактики/галактики со вспышкой звездообразования IRR/SB.

Для каждого интервала контраста плотности окружения и красного смещения доля каждого цвета в каждой ячейке отображает долю каждого диапазона типов галактик. На левой панели показана относительное число галактик для всех диапазонов типов для

контраста плотностей, полученного методом с адаптивной апертурой и сглаживанием плотности окружения, а на правой - методом диаграмм Вороного.

Многочисленные исследования показали сильную зависимость относительного количества галактик раннего типа от плотности окружающей среды для близких красных смещений (например, [5–7]). 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 .

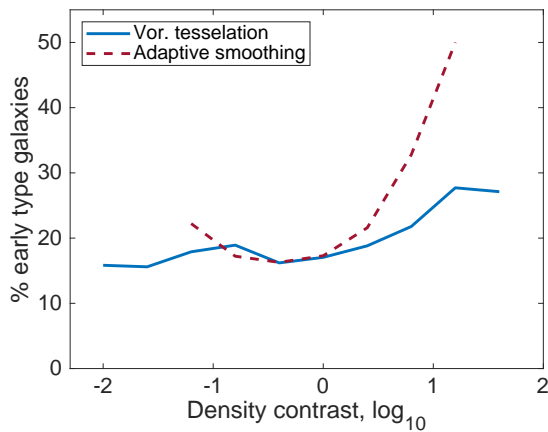


Рис. 14. Показано относительное число галактик ранних типов (согласно классификации по SED галактик E-Sa) в зависимости от контраста плотности окружения для двух методов восстановления карт контраста плотности: метода с адаптивной апертурой и сглаживанием плотности окружения (красная пунктирная линия)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

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были исследованы фотометрические свойства выборки галактик поля HS 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 $\sigma_z < 0.01$, которая позволяет определить принадлежность галактики к скоплению или группе.

На основе высокоточных фотометрических красных смещений для выборки из 28 398 галактик в диапазоне красных смещений 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 методов определения контраста в определении контраста плотности в тонких срезах крупно-

масштабного распределения галактик в диапазоне красных смещений 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 зависимости между типами галактик, определенными по SED, и плотностью окружения. Полученные результаты показывают, что галактики ранних типов предпочитают находиться в более плотных областях вплоть до $z \sim 0.8$, что находится в согласии с более ранними работами [1, 2], а также с результатами исследования поля COSMOS [17]. Полный набор карт распределения контраста плотности в 57 тонких слоях по красному смещению, а также анимация слоев доступны на [GitHub](#).

БЛАГОДАРНОСТИ

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.

This research has made use of the NASA/IPAC Extragalactic Database (NED), which is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, under contract with the National Aeronautics and Space Administration.

-
1. A. Oemler, PhD dissertation, California Institute of Technology (1974).
 2. A. Dressler, *Astrophysical Journal* **236**, 351 (1980).
 3. G. Kauffmann, S. D. M. White, T. M. Heckman, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **353**, 713 (2004).
 4. Y. J. Peng, S. J. Lilly, K. Kovač, et al., *Astrophysical Journal* **721**, 193 (2010).
 5. E. Madgwick, D. S. and Hawkins, O. Lahav, S. Maddox, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **344**, 847 (2003).
 6. H. Guo, I. Zehavi, Z. Zheng, et al., *The Astrophysical Journal* **767**, 1 (2013).
 7. H. Guo, Z. Zheng, I. Zehavi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **441**, 2398 (2014).
 8. O. Le Fèvre, L. Guzzo, B. Meneux, et al., *Astronomy and Astrophysics* **439**, 877 (2005).
 9. B. F. Gerke, J. A. Newman, M. Davis, et al., *The Astrophysical Journal* **625**, 6 (2005).
 10. B. Meneux, O. Le Fèvre, L. Guzzo, et al., *Astronomy and Astrophysics* **452**, 387 (2006).
 11. M. C. Cooper, J. A. Newman, D. J. Croton, et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **370**, 198 (2006).
 12. A. L. Coil, J. F. Hennawi, J. A. Newman, et al., *The Astrophysical Journal* **654**, 115 (2007).
 13. S. J. Lilly, O. L. Fevre, A. Renzini, et al., *The*

- Astrophysical Journal Supplement Series **172**, 70 (2007).
14. C. Wolf, K. Meisenheimer, M. Kleinheinrich, et al., *Astronomy and Astrophysics* **421**, 913 (2004).
 15. M. Moles, N. Benítez, J. A. Aguerri, et al., *Astronomical Journal* **136**, 1325 (2008).
 16. T. Murayama, Y. Taniguchi, N. Z. Scoville, et al., *The Astrophysical Journal Supplement Series* **172**, 523 (2007).
 17. N. Scoville, S. Arnouts, H. Aussel, et al., *The Astrophysical Journal Supplement* **206**, 26pp (2013).
 18. K. Molthagen, H. J. Wendker, and U. G. Briel, *Astronomy & Astrophysics Supplement series* **126**, 509 (1997).
 19. F. J. Lockman, K. Jahoda, and D. McCammon, *Astrophysical Journal* **302**, 432 (1986).
 20. E. Bertin and S. Arnouts, *Astronomy and Astrophysics Supplement* **117**, 393 (1996).
 21. S. e. a. Dodonov, “–,” In prep.
 22. R. Feldmann, C. M. Carollo, C. Porciani, et al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **372**, 565 (2006).
 23. S. N. Dodonov and I. V. Chilingarian, *Astrophysical Bulletin* **63**, 1 (2008).
 24. O. Ilbert, M. Salvato, P. Capak, et al., in *Panoramic Views of Galaxy Formation and Evolution*, Edited by T. Kodama, T. Yamada, and K. Aoki (2008), *ASP Conference Series*, vol. 399, p. 169.
 25. A. Grokhovskaya and S. N. Dodonov, *Astrophysical Bulletin* **74**, 379 (2019).
 26. Z. L. Wen and J. L. Han, *The Astrophysical Journal* **807**, 11pp (2015).
 27. M. Postman, L. M. Lubin, J. E. Gunn, et al., *Astronomical Journal* **111**, 165 (1996).
 28. B. P. Koester, T. A. McKay, J. Annis, et al., *Astronomical Journal* **660**, 239 (2007).
 29. Z. L. Wen, J. L. Han, and F. S. Liu, *The Astrophysical Journal Supplement* **187**, 272 (2010).
 30. B. P. Holden, R. C. Nichol, A. K. Romer, et al., *The Astronomical Journal* **118**, 2002 (1999).
 31. A. W. McConnachie, D. R. Patton, S. L. Ellison, and L. Simard, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **365**, 255 (2009).
 32. J. Hao, T. A. McKay, B. P. Koester, et al., *The Astrophysical Journal Supplement* **191**, 254 (1999).
 33. A. G. Smith, A. M. Hopkins, R. W. Hunstead, and K. A. Pimbblet, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **422**, 25 (2012).
 34. A. e. a. Grokhovskaya, “–,” In prep.

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 ^a)	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 +475842	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
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

^aThe NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) is
operated by the Jet Propulsion Laboratory, California
Institute of Technology, under contract with the National
Aeronautics and Space Administration.

Methods for analyzing the large-scale distribution of galaxies

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

The results of the study of the large-scale distribution of galaxies up to $z \sim 0.8$ in the field HS 47.5-22 on the basis of photometric data of the 1st Schmidt telescope of the BAO NAS are presented. The full sample contains 28 398 galaxies. Candidates for large-scale structures were determined using two independent methods for reconstructing density contrast maps in 57 narrow slices of the three-dimensional distribution of galaxies: adaptive aperture algorithm with smoothing and 2D Voronoi tessellation. We have identified more than 250 statistically significant overdense structures. The obtained results demonstrate a wide range of overdense structures over the full range of redshifts up to $z \sim 0.8$.

Keywords: galaxies: clusters: general, galaxies: statistics