

УДК 524.77-14/17

КРУПНОМАСШТАБНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЛАКТИК ПОЛЯ NS 47.5-22. I. МЕТОДИКА АНАЛИЗА ДАННЫХ

© 2019 А. А. Гроховская^{1*}, С. Н. Додонов^{1**}¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 3 сентября 2018 года; после доработки 26 июля 2019 года; принята к публикации 26 июля 2019 года

Представлены результаты методических работ по автоматическому анализу крупномасштабного распределения галактик. Выделение кандидатов в скопления и группы галактик проводилось с использованием двух взаимодополняющих методов определения карт контраста плотности в тонких слоях трехмерного крупномасштабного распределения галактик: фильтрующего алгоритма с адаптивным ядром и диаграмм Вороного. Разработанные алгоритмы были протестированы на 10 наборах данных модельного каталога MICE, кроме того были определены статистические параметры полученных результатов (полнота, чистота выборки и т.д.). Также полученные карты контраста плотности были применены для определения пустот-войдов.

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

1. ВВЕДЕНИЕ

Галактики представляют собой основные блоки, из которых устроена Вселенная. Однако полного понимания того, как они формируются и эволюционируют, до сих пор нет. Наблюдения галактик позволили создать морфологическую классификацию [1], а позднее изучение их физических свойств привело к более точной бимодальной классификации [2]. Связь между бимодальными типами галактик и их окружением впервые была обнаружена при изучении близких скоплений. Омлером [3] и Дресслером [4] была установлена так называемая зависимость «морфология—плотность окружения». Она выражается в том, что дисковые галактики со звездообразованием, как правило, находятся 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 для всего диапазона локальных плотностей вплоть до галактик поля.

Кроме того, обнаружено, что и другие физические свойства галактик коррелируют с плотностью окружения. Кауффманом и др. [8] показано, что локальная плотность оказывает влияние на цвета, эквивалентную ширину линии H α и величину скачка D4000 Å на масштабах порядка 1 Мпк ч⁻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 ранее, чем галактики с меньшей массой, а на эволюцию менее массивных галактик влияют сложные физические процессы, определяемые их окружением.

Локальные области с высокой плотностью определяются группами и скоплениями галактик, которые являются наиболее крупными гравитационно-связанными объектами во Вселенной, а области с низкой плотностью представлены войдами, занимающими до 95% объема Вселенной [12]. Определение групп и кластеров галактик, а также пустот-войдов является важной задачей современной космологии. Существует несколько наиболее популярных методов определения групп и скоплений галактик: по рентгеновскому излучению горячего межзвездного газа [13–15], по понижению яркостной температуры реликтового излучения на горячем межгалактическом газе из-за эффекта Сюняева—Зельдовича [16, 17], при наблюдении искажения изображений далеких галактик при слабом гравитационном линзировании группой или скоплением галактик [18], и по наиболее плотным областям в оптическом, близком и среднем ИК-диапазонах [19, 20].

В этой работе мы представляем методы автоматизированного анализа крупномасштабного распределения галактик, которые основаны на восстановлении карт контраста плотности фильтрую-

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

**E-mail: dodo@sao.ru

щим алгоритмом с адаптивной апертурой и диаграммами Вороного. Алгоритмы были применены к десяти наборам данных из моделирования задачи N тел для светового конуса от коллаборации MICE [21]. Полученные результаты соответствуют модельному распределению плотности в исследуемой выборке. Сделана их статистическая оценка. В следующей работе цикла мы используем эти методы для анализа крупномасштабного распределения галактик в поле HS 47.5-22 по данным наблюдений на 1-м телескопе Шмидта Бюраканской астрофизической обсерватории (БАО НАН).

Статья имеет следующую структуру. Во втором разделе кратко описаны данные, используемые для тестирования разработанных алгоритмов, приведены методы выделения скоплений и групп галактик из крупномасштабного распределения: построение карт контраста плотности методами с использованием адаптивной апертуры и диаграмм Вороного и критерии для последующей выборки кандидатов в структуры, и основные статистические выкладки для оценки работы алгоритмов. В третьем разделе описан алгоритм нахождения пустот в двумерных слоях трехмерного конуса выборки галактик. В Заключении перечислены основные результаты. В статье используется космологическая Λ CDM-модель с параметрами $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$ и $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

2. ВЫДЕЛЕНИЕ ГРУПП И СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

Первые каталоги скоплений галактик были составлены Эйбеллом в 1958 году [22] и Цвикки в период с 1961 по 1968 годы [23] при визуальном изучении Паломарского обзора, а в 80-х годах XX века уже появились полностью автоматизированные методы выделения кластерных структур (например, [24, 25]).

В нашей работе для определения кандидатов в кластерные структуры мы использовали методы анализа крупномасштабного распределения галактик с помощью диаграмм Вороного и адаптивной апертуры.

Мы протестировали разработанные методы определения составляющих крупномасштабного распределения галактик на 10 наборах данных из моделирования задачи N тел для светового конуса от коллаборации MICE [21]. Все выборки галактик ограничены областью 2 кв. градуса, предельной звездной величиной $R_{AB} = 23^m$ и красным смещением от 0 до 0.8, что соответствует ограничениям наблюдательных данных, которые будут анализироваться в дальнейшем. Координаты центров полей выборок, а также количество галактик и их скоплений для каждого из 10 наборов

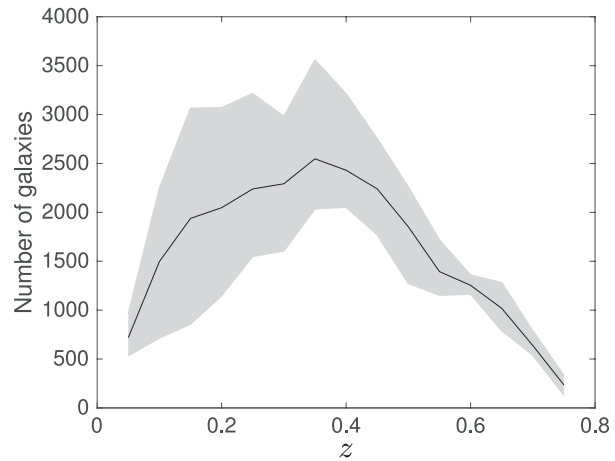


Рис. 1. Зависимость числа галактик от красного смещения. Для $z \sim 0.3-0.4$ заметен резкий рост числа галактик в слое, связанный с быстрым ростом объема светового конуса. Линия соответствует среднему количеству галактик в слое для 10 наборов данных галактик симуляции MICE, затененная область показывает разброс данных.

данных представлены в таблице. Также мы построили графики распределения количества галактик в зависимости от красного смещения (рис. 1) и распределения числа скоплений галактик в зависимости от красного смещения и богатства скоплений (рис. 2). На графиках прослеживается быстрый рост числа галактик и скоплений на $z \sim 0.3-0.4$ и его спад к $z \sim 0.7-0.8$, обусловленный предельной звездной величиной, которой ограничены выборки. Большинство галактик, которые относятся к крупномасштабным структурам, в исследуемых выборках собраны в группы, и лишь небольшая часть относится к скоплениям.

Данные модельного каталога MICE SAT удобны для тестирования алгоритмов выделения крупномасштабных структур, поскольку содержат информацию о гало темной материи, к которому принадлежит та или иная галактика. Соответственно, галактики с одинаковым идентификатором гало принадлежат к одному скоплению и гравитационно связаны.

Так как методы анализа разработаны для последующей работы с данными, полученными на 1-м телескопе Шмидта БАО НАН, точность определения фотометрического красного смещения для которых составляет 0.005, кандидаты в различные структуры определялись для тонких слоев крупномасштабной структуры с шагом $\Delta z = 0.01(1+z)$ для всех методов, также мы добавляли к этому интервалу по 25% от его значения с каждой стороны, чтобы избежать потерь в определении кластеров галактик, которые находятся на границе между двумя слоями.

Таблица. Параметры 10 выборок объектов из симуляции MICE

ID	RA	Dec	Число галактик	Число скоплений	ID	RA	Dec	Число галактик	Число скоплений
1	2 ^h 44 ^m 00 ^s	+41 00 00	13221	73	6	3 ^h 00 ^m 00 ^s	+43 00 00	9844	37
2	2 ^h 52 ^m 00 ^s	+41 00 00	10965	59	7	2 ^h 44 ^m 00 ^s	+45 00 00	14085	105
3	3 ^h 00 ^m 00 ^s	+41 00 00	10751	37	8	2 ^h 52 ^m 00 ^s	+45 00 00	15283	120
4	2 ^h 44 ^m 00 ^s	+43 00 00	12587	75	9	3 ^h 00 ^m 00 ^s	+45 00 00	11780	73
5	2 ^h 52 ^m 00 ^s	+43 00 00	12430	85	10	3 ^h 00 ^m 00 ^s	+47 00 00	12374	83

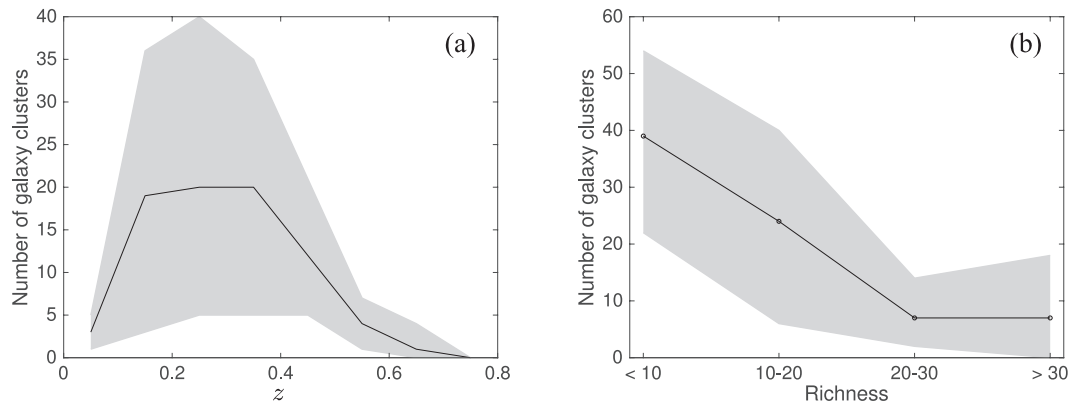


Рис. 2. Зависимости числа скоплений галактик от красного смещения (a) и от класса богатства скопления (b). Непрерывные линии показывают среднее количество скоплений галактик для 10 наборов данных галактик симуляции MICE, затененная область — разброс данных, по которому видно, что наборы для тестирования алгоритмов обладают разнообразным распределением скоплений галактик по красному смещению.

2.1. Алгоритм определения контраста плотности с адаптивной апертурой

Плотность распределения галактик определялась в окрестности каждой исследуемой галактики как:

$$\delta_i = \frac{s}{\frac{4}{3}\pi R^3}. \quad (1)$$

Ширина окрестности R , или адаптивная апертура, на которой происходило сглаживание значения плотности галактик, определялась расстоянием от галактики до s -го ближайшего соседа как трехмерное расстояние между исследуемой i -ой галактикой и ее j -ым соседом [26]:

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

где прямоугольные координаты X, Y, Z вычислены по формулам перехода от сферической к прямоугольной системе координат:

$$\begin{aligned} X_i &= R_i r_i \sin \Theta_i \cos \phi_i, \\ Y_i &= R_i r_i \sin \Theta_i \sin \phi_i, \end{aligned} \quad (3)$$

$$Z_i = R_i r_i \cos \Theta_i.$$

Углы $\Theta_i = (\frac{\pi}{2} - \text{Dec})$, $\phi_i = \text{RA}$ (в радианах); $R_i = \frac{1}{(1+z_i)}$ — масштабирующий фактор, z_i — красное смещение i -ой галактики; r_i — сопутствующее расстояние i -ой галактики, вычисляемое, согласно [27], по формуле:

$$r_i = \frac{c}{H_0} \int_0^{z_i} (\Omega_M(1+z_i)^3 + 1 - \Omega_M)^{-0.5} dz. \quad (4)$$

Скопления и группы галактик проявляются как пики на картах контраста плотности распределения галактик. Для того, чтобы обозначить положение пиков плотности, мы определяем среднюю плотность в слое

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i. \quad (5)$$

Здесь n — количество галактик в каждом слое. Далее мы вычисляем величину, указывающую на контраст плотности в каждой точке $\sigma_i + 1 = \frac{(\delta_i - \bar{\delta})}{\bar{\delta}} + 1$

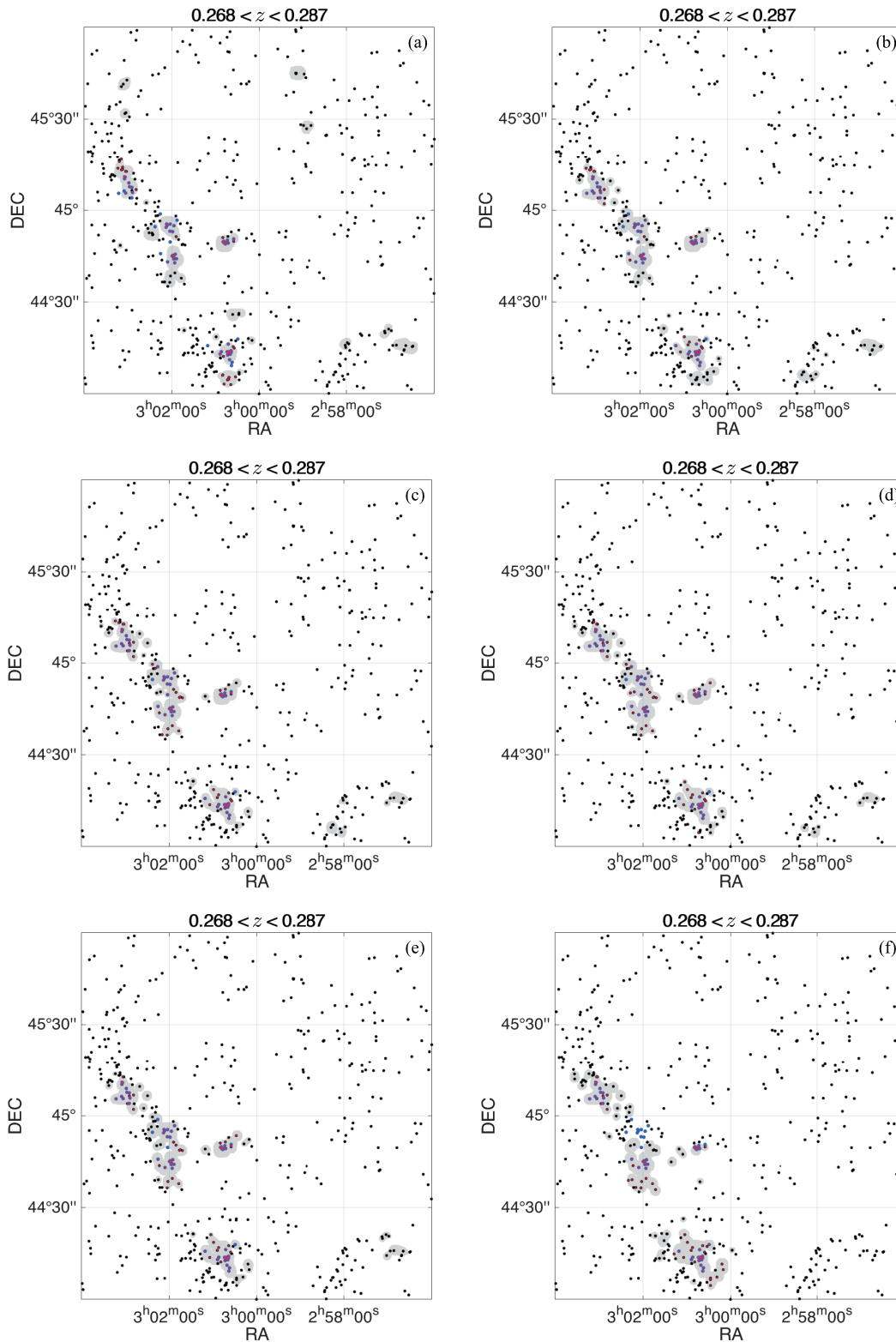


Рис. 3. Карты контраста плотности для двумерных слоев трехмерного крупномасштабного распределения галактик, полученные при использовании адаптивной апертуры до 2-го соседа (а), до 5-го (b), до 7-го (с), до 8-го (d), 10-го (е) и 25-го (f). Серым цветом выделены области, для которых контраст плотности превышает 2. Синими точками показаны галактики, которые принадлежат к общим гало темной материи в модельном каталоге; красными — галактики, находящиеся в скоплениях, определенных программно.

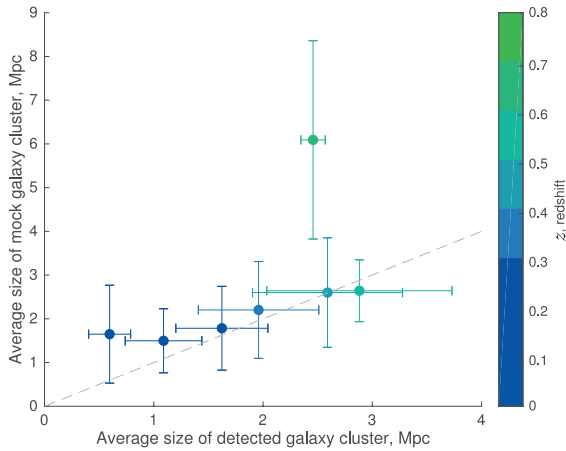


Рис. 4. Размер скоплений галактик, детектируемых фильтрующим алгоритмом с адаптивной апертурой, в зависимости от размера скоплений в модельном каталоге. Цветовая шкала соответствует красному смещению, бары показывают стандартное отклонение от среднего размера детектируемого и модельного скопления на каждом z . Значения приведены для 10 наборов параметров симуляции MICE.

и интерполируем значения контраста по всему полю.

В ходе работы мы исследовали использование адаптивных апертур до 2, 5, 7, 8, 10 и 20-го соседа (рис. 3). Статистические оценки (см. раздел 2.4) показывают, что увеличение размера адаптивной апертуры приводит к размытию пиков на картах контраста плотности распределения галактик и недоопределению крупномасштабных структур. В качестве рабочей апертуры метода мы выбрали расстояние до 8-го соседа, которое позволяет наилучшим образом выделять различные структуры.

Для рабочей апертуры были также оценены средние размеры детектируемых скоплений в зависимости от средних размеров скоплений в модельном каталоге в разрезе по красному смещению (рис. 4), которые соответствуют современным представлениям о размерах кластеров галактик от 2 до 5 Мпк. В диапазоне $0.6 \leq z \leq 0.7$ среди 10 выборок каталога MICE оказалось всего два скопления, чем объясняется большой разброс данных в этой точке. Для $0.7 \leq z \leq 0.8$ скопления галактик в каталоге отсутствуют из-за ограничений на R_{AB} и количество членов скоплений (больше восьми), детектируемых скоплений там также нет.

2.2. Алгоритм диаграмм Вороного для определения контраста плотности

Диаграммой Вороного называется такое геометрическое разбиение плоскости на многоугольники, которое обладает следующим свойством: для

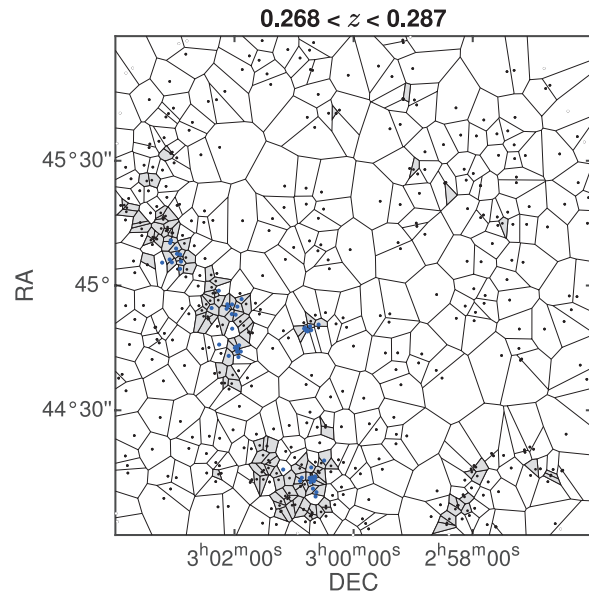


Рис. 5. Разбиение Вороного для двумерного тонкого слоя крупномасштабного распределения галактик. Серым цветом отмечены ячейки с плотностью, которая превышает среднюю плотность слоя более, чем в два раза. Синим цветом показаны галактики, которые принадлежат к общим гало темной материи в смоделированном каталоге.

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 [28]. В качестве вершин областей Вороного в данной работе используются исследуемые галактики. Процедура разбиения двумерной проекции слоя трехмерного крупномасштабного распределения галактик проведена с помощью процедур ‘voronoin’ и ‘voronoi’ в среде MatLab.

Величина, обратная площади области Вороного, является численной плотностью, соответствующей каждой галактике-вершине многогранника. Группы и кластеры галактик определяются аналогично предыдущему методу по пикам на карте контраста плотности для поля распределения галактик.

Контраст плотности определяется как $\sigma_i = \frac{(\delta_i - \bar{\delta})}{\bar{\delta}}$, а средняя плотность для слоя:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i, \quad (6)$$

где A_i — площадь многогранника Вороного вокруг i -ой галактики, а n — количество ячеек Вороного в исследуемом слое [29]. При расчете средней плотности не учитываются краевые точки, ячейки Вороного для которых уходят на бесконечность.

2.3. Определение групп и кластеров галактик

В качестве кандидатов в группы и кластеры галактик мы отбирали области с контрастом плотности $\sigma_i + 1 \geq 2$. Для алгоритма с использованием адаптивной апертуры кандидат в группу или скопление галактик должен содержать более девяти галактик-членов внутри области с контрастом плотности выше 2, а для алгоритма Вороного отвечать требованию о нахождении рядом с ячейкой по крайней мере еще восемь ячеек с контрастом плотности выше 2 (см. раздел 2.4). Пример разбиения тонкого среза крупномасштабного распределения галактик по красному смещению с отмеченными детектированными скоплениями и скоплениями из каталога, представлены на рис. 5.

В целом оба метода анализа крупномасштабного распределения галактик дают согласованный результат. Однако метод диаграмм Вороного, несмотря на высокую долю в определении галактик, принадлежащих скоплениям, и определении скоплений из каталогов в общем, показывает гораздо меньшую чистоту выборок как по скоплениям, так и по галактикам (см. рис. 6). Исходя из этого, можно сделать вывод, что метод диаграмм Вороного может быть полезен как дополнительный инструмент для определения скоплений, в то время как в качестве основного следует использовать алгоритм с адаптивной апертурой.

2.4. Основные статистические выкладки

Поскольку в модельном каталоге галактик MICE есть параметр, определяющий принадлежность галактики к скоплению, то можно оценить качество разработанных алгоритмов статическими методами. Мы пользовались критериями статистических оценок из работ [30, 31]. Согласно этим работам, считается, что группа i соответствует группе j , если группа j содержит более чем $f\%$ галактик группы i . Из чего можно определить, что соответствие может быть односторонним, когда группа i соответствует группе j , а обратное не верно, и двусторонним, когда группа i соответствует группе j и наоборот. Для нашей работы мы будем считать, что группа i соответствует группе j , если группа j содержит более 50% галактик группы i .

Термины полноты и чистоты выборки также можно определить для одностороннего и двустороннего соответствия. Обозначим $N_{\text{real}}^{\text{gr}}$ — число групп и скоплений галактик в модельном каталоге, $N_{\text{rec}}^{\text{gr}}$ — число групп и галактик, определенных программными алгоритмами. Тогда «односторонняя полнота выборки» скоплений, соответствующих гало темной материи скоплений модельного каталога, вычисляется как

$$c_1 = \frac{N_{\text{real}}^{\text{gr}} \rightarrow N_{\text{rec}}^{\text{gr}}}{N_{\text{real}}^{\text{gr}}}, \quad (7)$$

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

«Двусторонняя полнота выборки»:

$$c_2 = \frac{N_{\text{real}}^{\text{gr}} \leftrightarrow N_{\text{rec}}^{\text{gr}}}{N_{\text{real}}^{\text{gr}}}, \quad (8)$$

здесь $N_{\text{real}}^{\text{gr}} \leftrightarrow N_{\text{rec}}^{\text{gr}}$ — количество соответствий реальных групп из каталога группам, определенным программно, и наоборот. Аналогично, можно вычислить чистоту выборки:

$$p_1 = \frac{N_{\text{rec}}^{\text{gr}} \rightarrow N_{\text{real}}^{\text{gr}}}{N_{\text{rec}}^{\text{gr}}}, \quad (9)$$

$$p_2 = \frac{N_{\text{rec}}^{\text{gr}} \leftrightarrow N_{\text{real}}^{\text{gr}}}{N_{\text{rec}}^{\text{gr}}} \quad (10)$$

Все четыре параметра могут принимать значения от 0 до 1. Близкое к 1 значение параметра c_1 показывает, что количество неопределенных групп из каталогов мало. Для параметра p_1 такое значение показывает малую долю ложно-детектированных скоплений. Близкое к нулю значение отношений c_1 к c_2 и p_1 к p_2 говорит о переопределении (несколько группам из каталога соответствует одна программно определенная группа) или фрагментации (одной группе из каталога соответствует несколько программно выделенных) групп.

Статистические параметры c_1 , c_2 , p_1 и p_2 характеризуют работу программных алгоритмов для групп и скоплений галактик. Чтобы оценить ее для галактик в группах, обозначим выборку галактик в группах и скоплениях модельного каталога как $S_{\text{real}}^{\text{gal}}$, а выборку галактик программно выделенных скоплений как $S_{\text{rec}}^{\text{gal}}$. Далее введем параметр, показывающий долю успешно определенных галактик из модельного каталога:

$$S_{\text{gal}} = \frac{S_{\text{real}}^{\text{gal}} \cap S_{\text{rec}}^{\text{gal}}}{S_{\text{real}}^{\text{gal}}} \quad (11)$$

Знаменатель выражения равен количеству одинаковых членов в выборках $S_{\text{real}}^{\text{gal}}$ и $S_{\text{rec}}^{\text{gal}}$. Этот параметр показывает, какая часть галактик из групп и скоплений модельного каталога была определена программно.

Второй параметр, характеризующий работу программных алгоритмов для галактик — процент отскоков. Это часть всех галактик, программно выделенных в скопления, которые в модельном каталоге являются галактиками поля.

$$f_I = \frac{S_{\text{rec}}^{\text{gal}} \cap S_{\text{field}}^{\text{gal}}}{S_{\text{rec}}^{\text{gal}}} \quad (12)$$

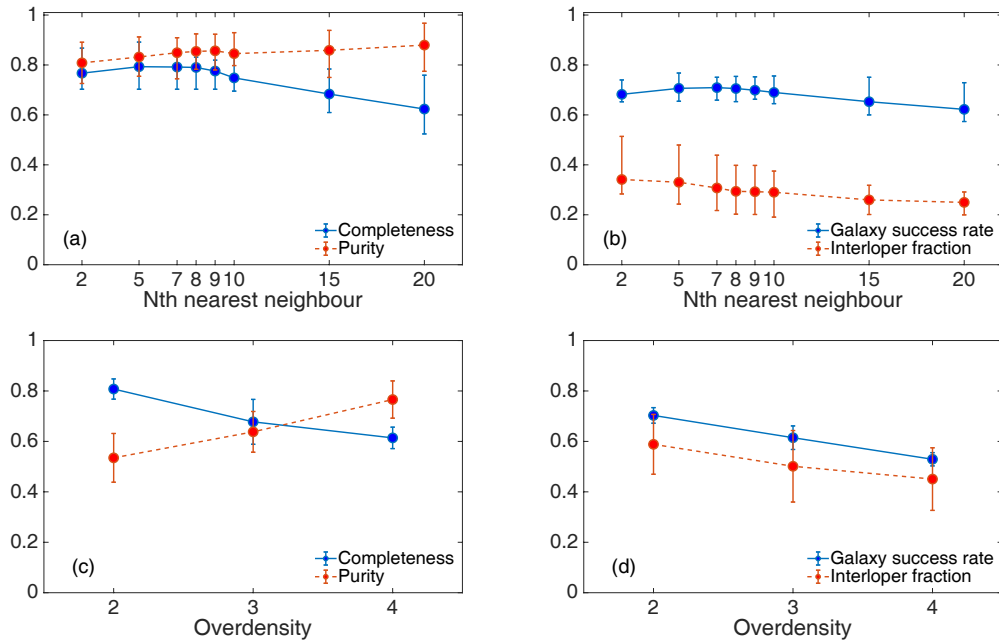


Рис. 6. Статические параметры выборки групп, скоплений и галактик в них, полученные программными алгоритмами. Верхние рисунки приведены для фильтрующего алгоритма с адаптивной апертурой, нижние для диаграмм Вороного. На рисунках слева показаны полнота (синяя сплошная линия) и чистота (красная пунктирная линия) выборки, справа — процент успешного определения галактик из скоплений модельного каталога (синяя сплошная линия) и процент галактик, определенных программно как галактики скоплений, но являющиеся галактиками поля в модельном каталоге (красная пунктирная линия). Бары соответствуют среднеквадратическому отклонению для 10 наборов параметров симуляции MICE.

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

Очевидно, что получить идеальное соответствие между модельным каталогом и восстановленными группами и скоплениями невозможно. Однако можно оптимизировать работу алгоритмов, исходя из представленных выше параметров, с помощью параметров качества полученных выборок, которые определены следующим образом:

$$g_1 = \sqrt{(1 - c_1)^2 + (1 - p_1)^2}, \quad (13)$$

$$g_2 = \frac{c_2 p_1}{c_1 p_2}, \quad (14)$$

$$g_3 = \sqrt{(1 - S_{gal})^2 + f_I^2}. \quad (15)$$

Параметр g_1 показывает баланс между параметрами полноты и чистоты полученных наборов групп и кластеров галактик, параметр g_2 — между односторонним и двусторонним соответствием, параметр g_3 — 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. Все три 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_3 , и максимизации параметра g_2 .

Поскольку для фильтрующего метода с адаптивной апертурой имеется возможность варьировать ее размер, то с целью оптимизации работы алгоритма для каждой из исследуемых апертур были рассчитаны соответствующие параметры качества выборки детектированных скоплений. Наилучшие были получены при размере адаптивной апертуры, равном 8. Он и был выбран как оптимальный для дальнейших исследований.

Для метода диаграмм Вороного нет аналогичных методу с адаптивной апертурой параметров, которые можно было бы варьировать внутри алгоритма. Однако, мы можем использовать различное значение контраста плотности, который определяет принадлежность галактик к группам и скоплениям. Оптимальным значением контраста плотности, исходя из параметров качества полученных выборок групп и скоплений, является значение равное двум.

3. ВЫДЕЛЕНИЕ ВОЙДОВ

Выделение пространственных областей низкой плотности также может быть полезно в дальнейшем для изучения на наблюдательных данных

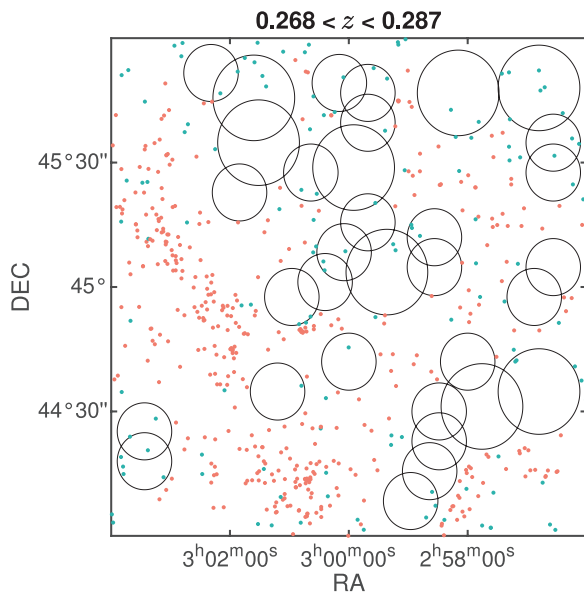


Рис. 7. Метод определения пустот в слоях крупномасштабного распределения галактик. Синими точками изображены галактики, для которых рассчитанная плотность в 10 раз меньше средней, красными — остальные.

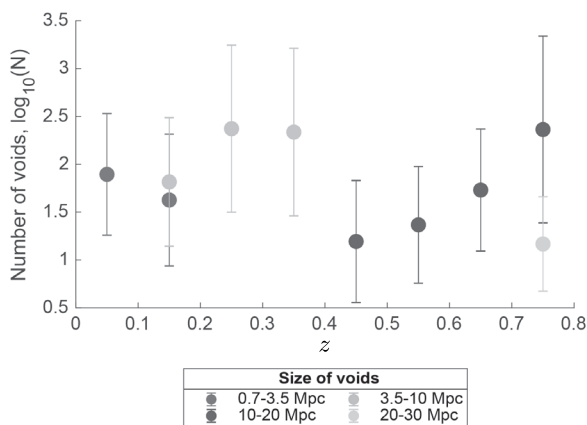


Рис. 8. Зависимость числа детектируемых войдов различных размеров от красного смещения. Точки соответствуют среднему значению размера войда, бары показывают стандартное отклонение от среднего размера детектируемого войда на каждом z для 10 наборов параметров симуляции MICE.

физических свойств галактик в зависимости от плотности окружения. При этом результаты, полученные на предыдущем шаге (значения контраста плотности для галактик крупномасштабного распределения), можно использовать для определения галактик, находящихся в войдах. В современных представлениях контраст плотности галактик в пустотах на порядок меньше средней величины плотности распределения галактик [12].

В основе использованного нами метода выде-

ления пустот лежит алгоритм, представленный в работе [32] для статистического анализа войдов из обзора 2dFGRS [5]. При определении пустот в каждом слое была использована сетка точек размером 100×100 , которая накладывалась на каждый слой отдельно. Для каждой точки определялись окружности максимального диаметра, в пределах которых либо вообще не было галактик, либо присутствовали только такие, для которых на предыдущем шаге было определено, что плотность их окружения на порядок меньше средней плотности в слое. Пустоты ограничивались с одной стороны границами поля, а с другой — галактиками, для которых плотность их окружения была больше плотности галактик в войдах. Шаг перебора радиусов окружностей был выбран равным 0.001 радиан, что соответствует величине от 0.297 до 2.83 Мпк в зависимости от красного смещения. Размер шага перебора выбирался исходя из оптимальности времени расчетов на близких и далеких красных смещениях.

Далее происходил отбор окружностей-пустот, согласно которому центры отобранных окружностей не должны были лежать внутри других отобранных окружностей и иметь максимальный радиус из всех возможных для данной области слоя. Кроме того, с ростом красного смещения вводилось ограничение на минимальный объем детектируемого войда.

Пример детектирования пустот для тонкого среза трехмерного крупномасштабного распределения галактик приведен на рис. 7. В ходе исследования работы алгоритма для 10 наборов данных из симуляции MICE было обнаружено, что пустоты редко имеют сферическую форму, объединяясь в различные структуры (цепочки и т.д.). Для модельных данных симуляции MICE были оценены средние размеры детектируемых войдов и их количество (рис. 8) в зависимости от красного смещения. Из графика видно, что на красном смещении $z \sim 0.1-0.2$ преобладают мини-войды с размерами приблизительно 0.7–3.5 Мпк, а с ростом размеров поля в нем становятся детектируемыми войды среднестатистического размера порядка 10–20 Мпк.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны алгоритмы многостороннего анализа крупномасштабного распределения галактик в тонких слоях на всем диапазоне красных смещений, включающие методы определения скоплений и групп галактик с помощью построения карт контраста плотности, а также определение пустот-войдов. Результаты их использования совпадают с визуальной оценкой структур в слоях, а средние размеры детектированных скоплений и войдов соответствуют современным оценкам с учетом

размеров исследуемого поля. Численная оценка результатов работы методов построения карт контраста плотности и выделения групп и скоплений была сделана по 10 наборам данных галактик и их скоплений из симуляции MICE, что позволило оценить полноту и чистоту выборки, а также долю верно выделенных галактик и скоплений, которые были ошибочно отнесены к скоплениям. Можно заключить, что разработанные нами алгоритмы являются устойчивым методом определения кандидатов в скопления и группы галактик, а также в межгалактические пустоты.

Представленная в работе методика будет в дальнейшем применяться для исследования крупномасштабного распределения галактик на наблюдательных данных, полученных на 1-метровом телескопе Шмидта Бюраканской астрофизической обсерватории, а также для изучения влияния окружения на физические параметры галактик (массу, светимость, темп звездообразования).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту за конструктивные замечания к первоначальному тексту статьи. This work has made use of CosmoHub. CosmoHub has been developed by the Port d'Informacio Cientifica (PIC), maintained through a collaboration of the Institut de Fisica d'Altes Energies (IFAE) and the Centro de Investigaciones Energeticas, Medioambientales y Tecnologicas (CIEMAT), and was partially funded by the «Plan Estatal de Investigacion Cientifica y Tecnica y de Innovacion» program of the Spanish government.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа проводилась при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 17-12-01335 «Ионизованный газ в галактических дисках и за пределами оптического радиуса».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. P. Hubble, *Astrophys. J.* **64**, 321 (1926).
2. M. Fioc and B. Rocca-Volmerange, *Astron. and Astrophys.* **351**, 869 (1999).
3. A. Oemler, *PhD dissertation* (California Institute of Technology, 1974).
4. A. Dressler, *Astrophys. J.* **236**, 351 (1980).
5. D. S. Madgwick, E. Hawkins, O. Lahav, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **344**, 847 (2003).
6. H. Guo, I. Zehavi, Z. Zheng, et al., *Astrophys. J.* **767**, 122 (2013).

7. H. Guo, Z. Zheng, I. Zehavi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **441**, 2398 (2014).
8. G. Kauffmann, S. D. M. White, T. M. Heckman, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **353**, 713 (2004).
9. O. Cucciati, A. Iovino, K. Kovac, et al., *Astron. and Astrophys.* **524**, A2 (2010).
10. G. De Lucia, B. M. Poggianti, A. Aragon-Salamanca, et al., *IAU Colloquium* **195**, 473 (2004).
11. O. Cucciati, A. Iovino, C. Marinoni, et al., *Astron. and Astrophys.* **458**, 39 (2006).
12. R. van de Weygaert and E. Platen, *International Journal of Modern Physics: Conference Series* **1**, 41 (2011).
13. A. K. Romer, P. T. P. Viana, A. R. Liddle, and R. G. Mann, *Astrophys. J.* **547**, 594 (2001).
14. M. Pierre, F. Pacaud, P. A. Duc, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372**, 591 (2006).
15. A. Finoguenov, L. Guzzo, G. Hasinger, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **172**, 182 (2007).
16. J. E. Carlstrom, G. P. Holder, and E. D. Reese, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **40**, 643 (2002).
17. G. M. Voit, *Reviews of Modern Physics* **77**, 207 (2005).
18. N. N. Weinberg and M. Kamionkowski, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **337**, 1269 (2002).
19. P. A. A. Lopes, R. R. de Carvalho, R. R. Gal, et al., *Astron. J.* **128**, 1017 (2004).
20. B. P. Koester, T. A. McKay, J. Annis, et al., *Astrophys. J.* **660**, 221 (2007).
21. J. Carretero, P. Tallada, J. Casals, et al., in *Proc. of the European Physical Society Conference on High Energy Physics* (Venice, 2017), p. 488.
22. G. O. Abell, *Astrophys. J. Suppl.* **3**, 211 (1958).
23. F. Zwicky, E. Herzog, P. Wild, et al., *Catalogue of galaxies and of clusters of galaxies, Vol. 1* (California Institute of Technology, Pasadena, 1961).
24. S. A. Shectman, *Astrophys. J. Suppl.* **57**, 77 (1985).
25. R. J. Dodd and H. T. MacGillivray, *Astron. J.* **92**, 706 (1986).
26. T. W. B. Kibble and F. H. Berkshire, *Classical Mechanics (5th Edition)* (World Scientific Press, 2004).
27. J. A. Peacock, *Cosmological Physics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1999).
28. M. Ramella, W. Boschin, D. Fadda, and M. Nonino, *Astron. and Astrophys.* **368**, 776 (2001).
29. I. K. Sochting, G. V. Coldwell, R. G. Clowes, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **423**, 2436 (2012).
30. B. F. Gerke, J. A. Newman, M. Davis, et al., *Astrophys. J.* **625**, 6 (2005).
31. C. Knobel, S. J. Lilly, A. Iovino, et al., *Astrophys. J.* **697**, 1842 (2009).
32. S. G. Patiri, J. E. Betancort-Rijo, F. Prada, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **369**, 335 (2006).

Large Scale Distribution of Galaxies in The Field HS 47.5-22. I. Data Analysis Technique**A. A. Grokhovskaya and S. N. Dodonov**

We present the results of methodological works on automated analysis of the large scale distribution of galaxies. Selecting candidates for clusters and groups of galaxies was carried out using two complementary methods of determining the density contrast maps in the narrow layers of the three-dimensional large scale distribution of galaxies: the filtering algorithm with an adaptive core and the Voronoi tessellation. The developed algorithms were tested on 10 data sets of the MICE model catalog; additionally, we determined the statistical parameters of the obtained results (completeness, sample purity, etc.). The constructed density contrast maps were also used to determine voids.

Keywords: *galaxies: clusters: general—galaxies: statistics*