

УДК 524.7-17

О. В. Мельник<sup>1</sup>, А. А. Эльвив<sup>1</sup>, И. Б. Вавилова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательская лаборатория «Астрономическая обсерватория»  
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко  
04053 Киев, ул. Обсерваторная, 3

<sup>2</sup>Институт космических исследований НАНУ-НКАУ  
03680 МСП Киев-187, ул. Академика Глушкова, 40

### Структура Местного сверхскопления галактик, выявленная трехмерным методом мозаики Вороного

Трехмерный метод мозаики Вороного впервые был применен для выделения групп галактик в структуре сверхскопления. Исследуемая выборка содержит больше 7000 галактик Местного Сверхскопления (МС) с лучевыми скоростями до 3100 км/с. В связи с существенной неоднородностью каталога МС было предложено «искусственное» перемасштабирование расстояния таким образом, чтобы концентрация галактик с увеличением расстояния изменялась по степенному закону с таким же показателем  $\beta$ , как и для полного однородного каталога. Учитывались разные параметры кластеризации: доля  $\alpha$  галактик, которые имеют относительный объем ячейки Вороного меньше критического (0.01, 0.1, 1 %) при случайном распределении;  $\beta = 0$ , соответствующий однородному распределению галактик,  $\beta = 0.7$ , близкий к блиноподобному распределению галактик. Оказалось, что метод мозаики Вороного слабо зависит от параметра  $\beta$ , а с увеличением  $\alpha$  число галактик в богатых структурах растет намного быстрее, чем в малочисленных. Сравнение полученных групп с группами, отобранными с помощью динамического метода Караченцева показало, что всеми компонентами совпадает 22 % групп. В целом, динамический метод более склонен выделять малонаселенные группы галактик, а метод Вороного — наоборот, более населенные.

СТРУКТУРА МІСЦЕВОГО НАДСКУПЧЕННЯ ГАЛАКТИК, ВИЯВЛЕНА ТРИВИМІРНИМ МЕТОДОМ МОЗАЇКИ ВОРОНОГО, Мельник О. В., Елїїв А. А., Вавилова І. Б. — Тривимірний метод мозаїки Вороного вперше було застосовано для виділення груп галактик у структурі надскупчення. Досліджувана вибірка налічує більше 7000 галактик Місцевого надскупчення (МН) з променевими швидкостями до 3100 км/с. Оскільки каталог галактик МН є суттєво неоднорідним, було запропоновано «штучне» перемасштабування відстані у такий спосіб, щоб концентрація галактик із зростанням відстані змінювалась за степеневим законом із таким самим показником  $\beta$ , як і для повного однорідного каталогу.

Враховувалися різні параметри кластеризації: доля  $\alpha$  галактик, які мають відносний об'єм комірки Вороного менший за критичний (0.01, 0.1, 1 %) для випадкового розподілу;  $\beta = 0$ , що відповідає однорідному розподілу галактик,  $\beta = 0.7$ , що близький до млинцевоподібного розподілу галактик. Виявилось, що метод мозаїки Вороного слабо залежить від параметра  $\beta$ , а зі зростанням  $\alpha$  кількість галактик у багатих структурах зростає набагато швидше, ніж у малонаселених. Порівняння отриманих груп з групами, відібраними за допомогою динамічного методу Караченцева показало, що всіма компонентами співпадає 22 % груп. В цілому, динамічний метод краще виділяє малонаселені групи галактик, а метод Вороного — навпаки, більш населені.

*THE STRUCTURE OF THE LOCAL SUPERCLUSTER OF GALAXIES DETECTED BY THREE-DIMENSIONAL VORONOI'S TESSELLATION METHOD, by Melnyk O. V., Elyiv A. A., Vavilova I. B. — 3D Voronoi's tessellation method was first applied to identify groups of galaxies in the structure of a supercluster. The sample under consideration consists of more than 7000 galaxies of the Local Supercluster (LS) with radial velocities up to 3100 km/s. Because of an essential non-homogeneity of the LS catalogue, it was proposed to overscale distances in such an «artificial» way that the concentration of galaxies was varying as with increase of the distance a power-behaved function with the same exponent  $\beta$  as for the full homogeneous catalogue. Various parameters of clustering were taking into account:  $\alpha$  (0.01, 0.1, 1 %) as the part of galaxies, which have the relative volume of a Voronoi's cell smaller than the critical one for the random distribution;  $\beta = 0$ , which fits to the random galaxy distribution;  $\beta = 0.7$ , which is close to the pancake galaxy distribution. It is revealed that Voronoi's tessellation method depends weakly on  $\beta$ -parameter, and the number of galaxies in rich structures is growing rather than in poor ones with increase of  $\alpha$ -parameter. The comparison of the groups derived with the groups obtained by Karachentsev's dynamical method shows that the number of groups, which coincides by all the components, is 22 %. As a whole, the dynamical method is more preferred for identifying sparsely populated galaxy groups, whereas 3D Voronoi's tessellation method is preferred for more populated ones.*

## ВВЕДЕНИЕ

Местное сверхскопление галактик (МС), как и другие сверхскопления, не имеет четких границ. Под МС подразумевается объем ближней Вселенной, которую заполняют галактики с лучевыми скоростями примерно до 3000 км/с. Структура МС активно изучается более 30 лет, начиная с работ Вокулера [23]. Талли [19] определил, что МС имеет три главных составляющих: 20 % ярких галактик находятся в скоплении Дева (центральной части МС), 40 % концентрируются в дисковой составляющей, 40 % образуют «гало»; МС имеет неправильную форму. Исследования Эйнасто и др. [5] показали, что МС имеет волокнистоподобную структуру: цепочки галактик соединяют между собой доминирующие скопления (группы) галактик. Серия работ по выявлению внутренней 2D- и 3D-структуры МС как в целом, так и отдельных его скоплений и групп появилась в 1980-х годах. Прежде всего это работы, которые стали классическими, — каталог групп Геллер и Хукры [7] и каталог близких групп Талли [20], свойства которых рассмотрены в работах [9, 20, 21]. Тенденция ярких галактик и карликовых галактик низкой поверхностной яркости МС к сгущиванию проанализирована, например, в работах [4, 11].

Наряду с этим значительно вырос интерес к исследованию и применению различных методов кластеризации галактик и выделению их групп. Так, перколяционный и иерархический методы выделения групп галактик, предложенные в работах [7, 20], являются наиболее популярными алгоритмами кластеризации до настоящего времени. Эти методы стали основой для выделения и сравнения свойств групп галактик в объеме МС в работах [6, 8, 10]. В работе [18] для выделения групп галактик ( $v < 12000$  км/с) применялся модифицированный перколяционный метод.

Иной подход к выделению групп галактик МС был применен Д. И. Макаровым и И. Д. Караченцевым [15]. Он основан на динамическом алгоритме и позволяет наиболее полно учесть индивидуальные характеристики галактик [12]. Критерии отбора галактик в эту выборку МС и процедура выделения групп описаны в работах [1, 3, 15]. Далее мы будем ссылаться на этот каталог групп галактик МС [15] как на каталог МК.

Целью данной работы является выделение групп галактик МС альтернативным методом и сравнение их с группами из списка МК. Это позволит выяснить, как влияют критерии кластеризации на характеристики групп, отобранных из одного и того же каталога галактик с одной стороны, и как согласуются два различных метода (динамический и геометрический) — с другой. Для достижения этой цели мы предпочли геометрический метод мозаики Вороного прежде всего потому, что он не применялся еще для кластеризации групп галактик в 3D-пространстве, и более чувствителен к выявлению продолговатых структур, каким является Местное сверхскопление галактик. По сравнению с ним, например, вейвлет-анализ более чувствителен к выявлению структур сферической формы [24] и зависит от выбора размеров исследуемого скопления, числа галактик в скоплении и расстояния до него [16].

3D-метод мозаики Вороного — это геометрический метод, в котором используются только положения галактик и их лучевые скорости. Суть метода состоит в том, что все пространство, содержащее галактики, разбивается на элементарные объемы (в нашем случае размером  $10$  км/с). Те из элементарных объемов, которые находятся ближе к данной галактике, чем

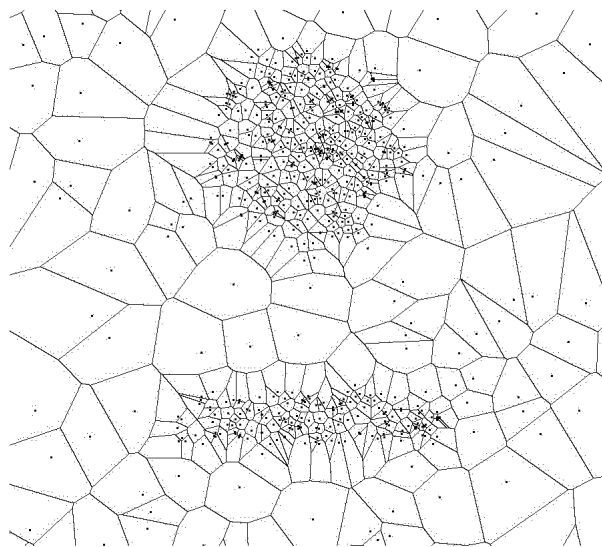


Рис. 1. Пример 2D-мозаики Вороного. На площадке размером  $1000 \times 1000$  пкл (элементарных площадок) случайным образом распределены 140 точек фона и два смоделированных скопления: радиус верхнего — 150 пкл (330 ядер), размер нижнего —  $400 \times 80$  пкл (150 ядер)

к остальным, образуют объем ячейки Вороного этой галактики. Сама галактика является ядром этой ячейки. Близкие галактики, имеющие объем меньше, чем критический, образуют группу (рис. 1). Автоматизированная процедура нахождения скоплений в 2D-случае описана в работе [17].

Метод ячеек Вороного широко используется в различных областях науки, о чем свидетельствуют регулярные международные совещания и конференции по теории чисел и пространственным мозаикам, в том числе в Украине, где родился и работал Г. Вороной [25, 26]. О его применении к астрофизическим задачам см., например, работы [22, 25, 26].

### ПОДГОТОВКА ОДНОРОДНОЙ ВЫБОРКИ

Исследуемый каталог галактик МС содержит 7064 галактики с лучевыми скоростями  $v < 3100$  км/с, приведенными относительно центроида Местной группы согласно [13]. На рис. 2, а показано распределение числа галактик в единице объема МС по лучевой скорости: концентрация с глубиной уменьшается на четыре порядка. На рис. 2, б приведено распределение абсолютной звездной величины галактик по лучевой скорости. Каталог достаточно неоднородный, в частности, нет четкого значения граничной звездной величины (как это было бы при наблюдениях одним инструментом). Выборка селективна по глубине относительно карликовых (слабых по светимости) галактик МС [2]. Наличие большого количества карликовых галактик в Местной группе, т. е. в непосредственной близости от Галактики, также влияет на неоднородность выборки. Кроме этого, в качестве оценки расстояний используются лучевые скорости, что делает сверхскопление более вытянутым по радиальной составляющей. Вычислив объемы ячеек Вороного галактик этой выборки, мы получили бы значительно меньшие объемы у близких галактик, чем у далеких. Поэтому прямое применение геометрического метода мозаики Вороного к такому неоднородному каталогу нецелесообразно.

При применении перколяционного и иерархического методов этот эффект учитывается с помощью введения функции светимости в расчет параметров кластеризации [6, 10, 18], при этом выборка ограничена по видимой звездной величине  $m$ . В динамическом методе [12] выборку по  $m$  не ограничивают, а этот эффект косвенно учитывается в динамических условиях кластеризации (более яркие и более массивные галактики счита-

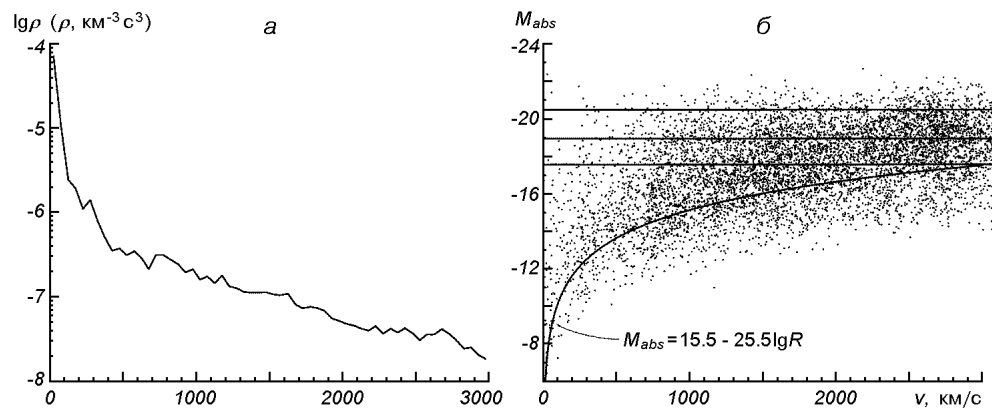


Рис. 2. Распределения галактик МС по лучевой скорости  $v$ : а — концентрации, б — абсолютной звездной величине. Прямыми показаны граничные значения  $M_{abs}^0 = -17.5^m, -19^m, -20.5^m$

ются членами группы, будучи на большем расстоянии друг от друга, чем менее массивные).

Без учета функции светимости и динамики галактик получить однородный каталог можно двумя способами. Первый из них достигается ограничением выборки по абсолютной звездной величине, для МС  $M_{\text{abs}}^0 = -17.5^{\text{m}}$  [3]. При этом граничная видимая звездная величина равна  $15.5^{\text{m}}$ , а абсолютная звездная величина  $M_{\text{abs}}$  галактики с  $m = 15.5^{\text{m}}$  на расстоянии 3100 км/с равна  $M_{\text{abs}}^0$ . В этом случае в каталоге остаются галактики ярче  $M_{\text{abs}}^0$  (рис. 2, б).

Второй способ предусматривает учет всех галактик каталога. Он состоит в искусственном перемасштабировании расстояния таким образом, чтобы концентрация галактик с глубиной выборки изменялась по степенному закону с таким же показателем, как и для полного однородного каталога. В работе [3] для однородного каталога по светимости ( $M_{\text{abs}} < -17.5^{\text{m}}$ ) была получена оценка наклона  $\beta = 0.7$  (см. ниже). Если экстраполировать это значение на данную выборку МС, то изменение концентрации галактик с расстоянием будет связано с реальным распределением галактик в пространстве, а не с недостатком слабых галактик на больших расстояниях. Рассмотрим детальнее такой подход.

Введем новое расстояние как функцию лучевой скорости  $u = f(v)$ . Концентрация галактик в «новом» пространстве изменяется по закону

$$\rho(u) = A \cdot u^{-\beta}.$$

В «старом» пространстве концентрация галактик на расстоянии  $v$  равна

$$\rho(v) = \frac{dn}{4\pi v^2 dv}, \quad (1)$$

а в новом пространстве —

$$\rho(u) = \frac{dn}{4\pi u^2 du} = A \cdot u^{-\beta}. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) получаем

$$\frac{\rho(v)}{A \cdot u^{-\beta}} = \frac{u^2 du}{v^2 dv},$$

или

$$A \int u^{2-\beta} du = \int \rho(v) v^2 dv. \quad (3)$$

При этом количество галактик внутри сферы радиусом  $v$  равно

$$N(<v) = \int_0^v 4\pi v^2 \rho(v) dv. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3) и интегрируя, получаем

$$u(v) = \left( \frac{3-\beta}{4\pi A} N(<v) \right)^{\frac{1}{3-\beta}}. \quad (5)$$

Задаем граничное условие  $u(v_{\text{max}}) = v_{\text{max}}$ , где  $v_{\text{max}} = 3100$  км/с — максимальная лучевая скорость. С учетом граничного условия из выражения (5) получаем значение константы

$$A = \frac{(3-\beta)N}{4\pi v_{\text{max}}^{3-\beta}},$$

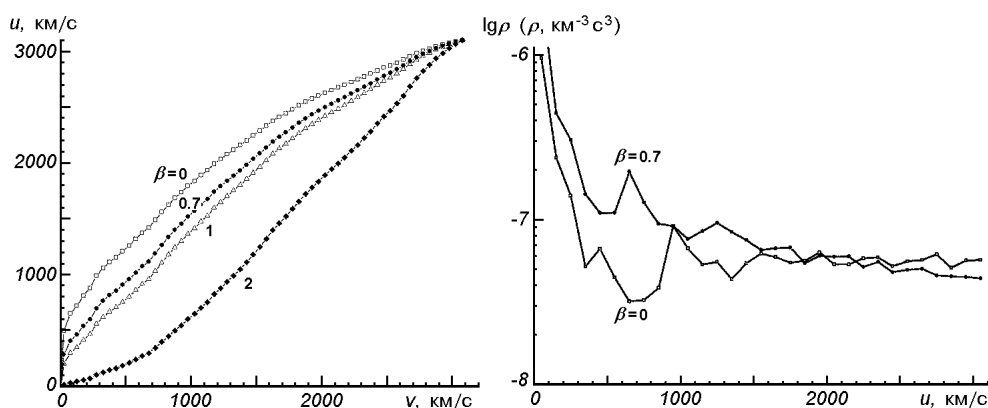


Рис. 3. Зависимость нового расстояния  $u$  от лучевой скорости  $v$

Рис. 4. Зависимость концентрации галактик в новом пространстве от нового расстояния  $u$

где  $N = 7064$  — количество галактик в выборке. Тогда

$$u(v) = v_{\max} \left( \frac{N(<v)}{N} \right)^{\frac{1}{3-\beta}}. \quad (6)$$

Такой подход — перемасштабирование расстояния — можно интерпретировать как выбор единицы длины для соответствующей глубины сверхскопления. Он позволяет привести к одному масштабу ближние малые по размерам группы и дальние, большие. Формула (6) связывает «старое» расстояние  $v$  с «новым»  $u$ . Эта зависимость изображена на рис. 3 для следующих значений параметра  $\beta$ :  $\beta = 0$  соответствует однородному распределению галактик с глубиной,  $\beta = 1$  — блиноподобному,  $\beta = 2$  — нитеподобному. Мы решили остановиться на параметре  $\beta = 0.7$  [3], а также рассмотреть случай  $\beta = 0$ , чтобы определить, насколько метод чувствителен к этому параметру.

На рис. 4 представлена зависимость концентрации галактик от расстояния в новом пространстве  $u$ . Теперь концентрация изменяется в пределах одного порядка, согласно заданному наклону  $\beta$ , и не имеет резкого отрицательного тренда к границе сверхскопления. На рис. 5, а, б показаны распределения галактик в  $v$ - и  $u$ -пространствах, на рис. 5, в для сравнения изображено случайное распределение того же количества галактик. Представлены также распределения галактик из подвыборок МС, ограниченных по абсолютной звездной величине:  $г$  — галактики с  $M_{\text{abs}} < -17.5^m$ ,  $д$  — яркие галактики с  $M_{\text{abs}} < -19^m$ ,  $е$  — самые яркие галактики с  $M_{\text{abs}} < -20.5^m$ . Даже визуальное сравнение демонстрирует, что распределение галактик в этих подвыборках различно. Распределение самых ярких галактик  $M_{\text{abs}} < -20.5^m$  ближе к случайному (но не соответствует случайному). При этом такой эффект в распределении галактик может зависеть не от их светимости, а от их количества (чем меньше галактик, тем слабее они сгущаются (см. рис. 5, б).

Проанализируем более детально эти распределения и выделим группы МС галактик 3D-методом Вороного.

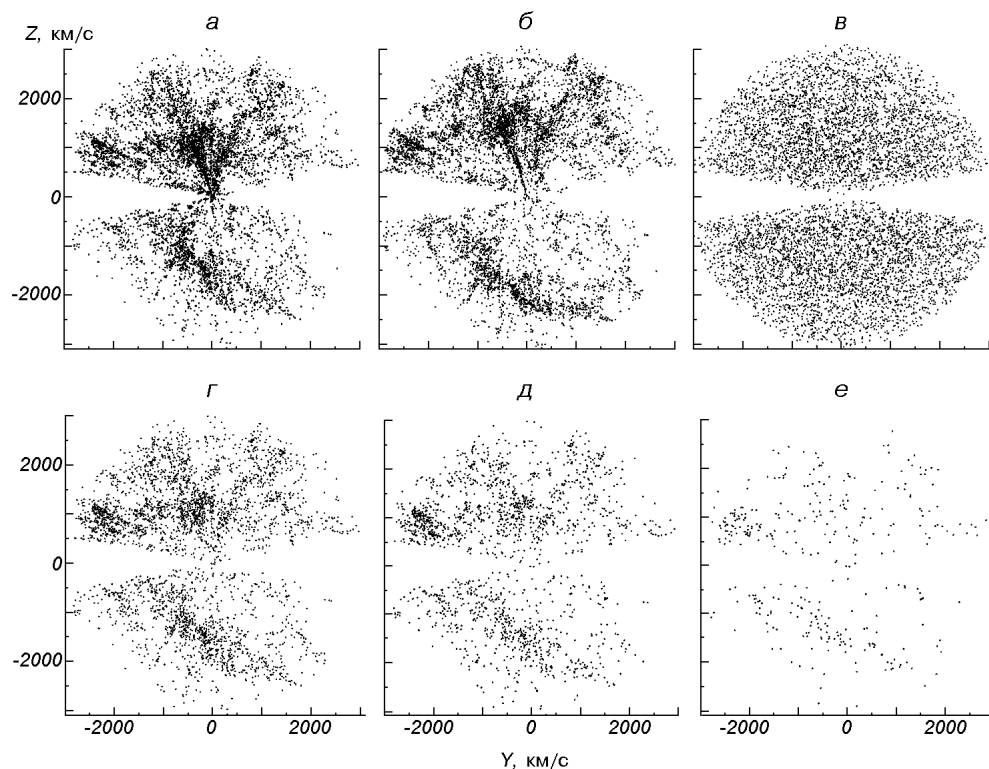


Рис. 5. Проекция галактик выборки МС на плоскость, перпендикулярную к галактической: *a* — в пространстве *v*, *б* — в пространстве *u*, *в* — случайное распределение того же количества галактик, *г* — кластеризованное распределение галактик МС с  $M_{\text{abs}} < -17.5^m$  в пространстве *v*, *д* — распределение галактик МС с  $M_{\text{abs}} < -19^m$  в пространстве *v*, *е* — распределение галактик МС с  $M_{\text{abs}} < -20.5^m$  в пространстве *v*

#### ПОИСК ГРУПП ГАЛАКТИК МЕТОДОМ МОЗАИКИ ВОРОНОГО

Согласно Кингу [14] плотность распределения объемов ячеек Вороного при случайном распределении ядер аналитически описывается функцией

$$H(x, c) = \frac{c}{\Gamma(c)} (cx)^{c-1} e^{-cx}, \quad (7)$$

где  $x = V/\langle V \rangle$ ,  $V$  — объем ячейки Вороного,  $\langle V \rangle$  — среднее значение объема ячейки Вороного,  $\Gamma(c)$  — гамма-функция, для трехмерного случая  $c = 6$ .

Процедура выделения групп галактик состоит в следующем: будем считать, что кластеризованными галактиками являются те, у которых объем ячейки Вороного меньше, чем некоторый граничный относительный объем  $x_{\text{lim}}$ . В качестве граничного примем такое значение  $x_{\text{lim}}$ , чтобы доля  $\alpha$  галактик при случайном распределении имела объем ячейки Вороного, меньший  $x_{\text{lim}}$ . На рис. 6 изображены интегральные функции относительных объемов ячеек Вороного при случайном распределении согласно (7), а также для рассматриваемых подвыборок МС. Для значения параметра  $\alpha = 0.1\%$  значение  $x_{\text{lim}} = 0.1825$ . Оставшиеся галактики приобретают статус «некластеризованных» для данного граничного объема ячейки Вороного. Среди них есть такие, которые входят в группы, но их ячейки имеют объем, превышающий  $x_{\text{lim}}$ , так как они находятся на границе групп (см. рис. 1, где у обоих скоплений хорошо видны граничные ячейки большого размера). Мы доба-

Таблица 1. Параметры кластеризации для подвыборок галактик МС, ограниченных по  $M_{\text{abs}}^0$

$M_{\text{abs}}^0$	$N$	$\langle V \rangle$	$R$ , км/с	$N_{\text{gr}}$	$N_{\text{ncl}}$
-17.5	3730	27645	85.8	1637 (43.9 %)	2093 (56.1 %)
-19	1826	56471	108.8	718 (39.3 %)	1108 (60.7 %)
-20.5	351	293778	188.5	112 (31.9 %)	239 (68.1 %)

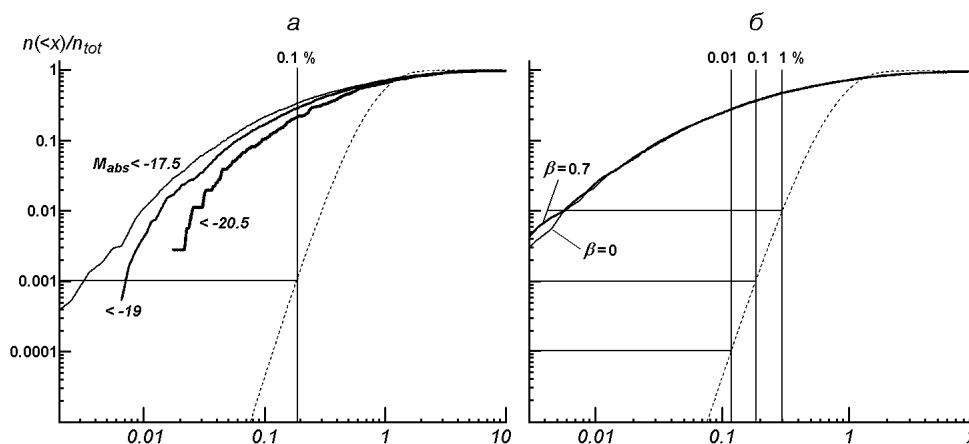


Рис. 6. Сравнение интегральных наблюдаемых распределений относительных объемов  $x$  со случайным распределением относительных объемов ячеек Вороного (пунктир): *a* — для подвыборок, ограниченных по  $M_{\text{abs}}$ , *б* — для подвыборок, отвечающих разным параметрам  $\beta$

вли в группы лишь те граничные галактики, расстояние от которых до ближайшей кластеризованной галактики меньше характерного радиуса наибольшей ячейки  $R = 0.5d \sqrt[3]{x_{\text{lim}} \langle V \rangle}$ ,  $d = 10$  км/с — выбранный размер элементарного объема МС. В выборке кластеризованных галактик есть также «лишние» галактики с относительным объемом ячеек Вороного, меньшим, чем критический, но вблизи них нет ни одной галактики на расстоянии меньше  $R$ . Следуя вышеизложенному критерию, в выборку кластеризованных мы добавили «граничные» галактики и отбросили «лишние». Таким образом, с помощью 3-мерного метода Вороного мы разделили выборку на две части: галактики в группах и некластеризованные.

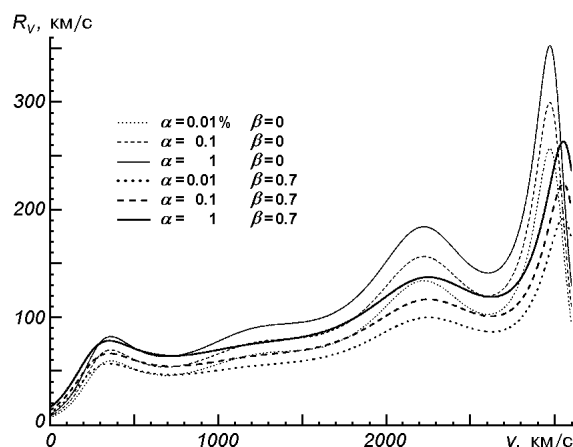
Приведем результаты применения 3D-метода Вороного для однородных выборок, полученных рассмотренными в предыдущем разделе способами.

1. Сначала рассмотрим три выборки МС, ограниченные по абсолютной звездной величине (рис. 2, б):  $M_{\text{abs}} < -17.5, -19, -20.5^m$  (в этих случаях, чтобы достичь однородности каталога, перемасштабировать расстояние не нужно). В табл. 1 представлены следующие параметры:  $N$  — количество галактик в выборке,  $\langle V \rangle$  — значения средних объемов ячеек Вороного (в условных единицах),  $R$  — характерный радиус наибольшей ячейки,  $N_{\text{gr}}$  — число галактик в группах,  $N_{\text{ncl}}$  — число некластеризованных галактик. Сравнение интегральных распределений относительных объемов  $x$  ячеек Вороного этих трех выборок со случайным распределением показано на рис. 6, *a*: при малых  $x$  реальное распределение галактик резко отличается от случайного, при этом чем более яркие галактики остаются в подвыборке,



Таблица 2. Параметры кластеризации для полной выборки галактик МС при разных значениях  $\alpha$  и  $\beta$ 

$\alpha$ , %	$x_{\text{lim}}$	$R$ , км/с	$N_{\text{gr}}$ ( $\beta = 0$ )	$N_{\text{ncl}}$ ( $\beta = 0$ )	$N_{\text{gr}}$ ( $\beta = 0.7$ )	$N_{\text{ncl}}$ ( $\beta = 0.7$ )
0.01	0.115	59.4	2523 (35.7 %)	4541 (64.3 %)	2497 (35.3 %)	4567 (64.7 %)
0.1	0.1825	69.3	3306 (46.8 %)	3758 (53.2 %)	3309 (46.8 %)	3755 (53.2 %)
1	0.297	81.5	4094 (58.0 %)	2970 (42.0 %)	4126 (58.4 %)	2938 (41.6 %)

Рис. 7. Изменение характерного радиуса ячейки Вороного, соответствующей объему  $x_{\text{lim}}$ , в пространстве  $v$ 

ограниченной  $M_{\text{abs}}^0$ , тем ближе к случайному распределению объемов их ячеек.

2. Применим 3D-метод Вороного для полной выборки галактик МС, перемасштабированной согласно (6), где  $\beta = 0$  и  $0.7$ ,  $\langle V \rangle = 14597$ . Нормируя объемы всех ячеек на эту величину, получим интегральное распределение (рис. 6, б). Очевидно, что при малых  $x$  реальное распределение сильно отличается от случайного, как и в варианте 1. Рассмотрим три значения  $x_{\text{lim}}$ , при которых 0.01, 0.1 и 1 % галактик при случайном распределении будут иметь относительный объем  $x$ , меньший, чем  $x_{\text{lim}}$ . Параметры кластеризации, соответствующие  $\alpha = 0.01$ , 0.1 и 1 %, представлены в табл. 2. Отметим, что характерный радиус наибольшей ячейки  $R$  — это постоянная величина в пространстве  $u$ ; в реальном пространстве  $v$  эта величина изменится с лучевой скоростью в интервале от 10 до 350 км/с (рис. 7).

Поскольку под группой галактик подразумевается совокупность галактик, расстояние между которыми меньше радиуса кластеризации  $R$ , то группы, выделенные первым способом, будут в среднем иметь большие размеры, чем вторым (табл. 1 и 2). При этом, как следует из табл. 1, чем меньше галактик представлено в подвыборках, ограниченных по  $M_{\text{abs}}$ , тем больше доля некластеризованных галактик ( $N_{\text{ncl}}$ ). Другими словами, чем более яркие галактики остаются в подвыборке, тем слабее они показывают тенденцию к скупиванию. В результате группы, выявленные первым способом, невозможно сопоставить с группами, полученными вторым способом.

Поскольку, как мы отмечали во введении, целью работы является также сравнение групп, отобранных из одного и того же каталога галактик МС альтернативными методами, далее с группами МК мы будем сравнивать только группы, выделенные вторым способом при разных параметрах  $\alpha$  и  $\beta$ .

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ГРУПП ГАЛАКТИК С ГРУППАМИ МК

Мы получили шесть выборок групп, отобранных геометрическим методом Вороного (далее мы будем ссылаться на эти выборки как на группы МЭВ) при разных параметрах  $\alpha$  и  $\beta$ . Сравним их с выборкой групп МК, отобранных динамическим методом [12]. В табл. 3 показано количество групп  $n_{gr}^{tot}$  галактик МЭВ при данных  $\alpha$  и  $\beta$ , количество групп МК, а также доля совпавших групп  $n_{gr}^m/n_{gr}^{tot}$ .

Таблица 3. Сравнение количества групп МЭВ с группами МК

МЭВ	$\beta = 0$			$\beta = 0.7$			МК	
	$\alpha, \%$	0.01	0.1	1	0.01	0.1		1
$n_{gr}^{tot}$		557	608	644	531	605	645	929
$n_{gr}^m/n_{gr}^{tot}$		0.21	0.22	0.23	0.18	0.22	0.22	—

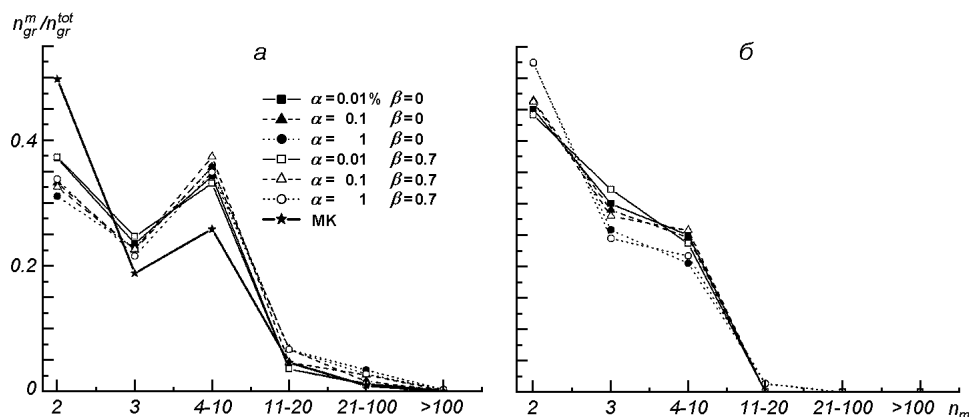


Рис. 8. Распределения: а — относительного числа групп галактик по количеству компонентов в группе для разных значений параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , б — относительного числа совпавших с МК групп галактик МЭВ

Наибольшее относительное количество групп МЭВ совпадает с группами МК при  $\alpha = 0.1$  и  $1 \%$ : независимо от  $\beta$  доля совпавших групп составляет  $22 \%$ . На рис. 8, а представлены распределения количества групп, соответствующие разным значениям компонентов  $n_m$  в группе для всех выборок,  $n_{gr}^m/n_{gr}^{tot}$  — отношение количества групп при данном  $n_m$  к общему количеству групп данной подвыборки. На рис. 8, б представлены распределения совпавших групп при данном  $n_m$ .

Отождествление групп показывает, что трудно сделать вывод о том, какая из подвыборок МЭВ наилучшим образом совпадает с группами МК, поскольку для разных количеств галактик в группе наибольшее число совпадений приходится на разные значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , что и следовало ожидать. Чем менее населена группа, тем больше таких групп совпадает. А именно, наибольшее количество совпавших групп — это группы малой численности: совпавших пар примерно  $45 \%$ , триплетов —  $30 \%$ , групп от 4 до 10 компонентов —  $25 \%$ .

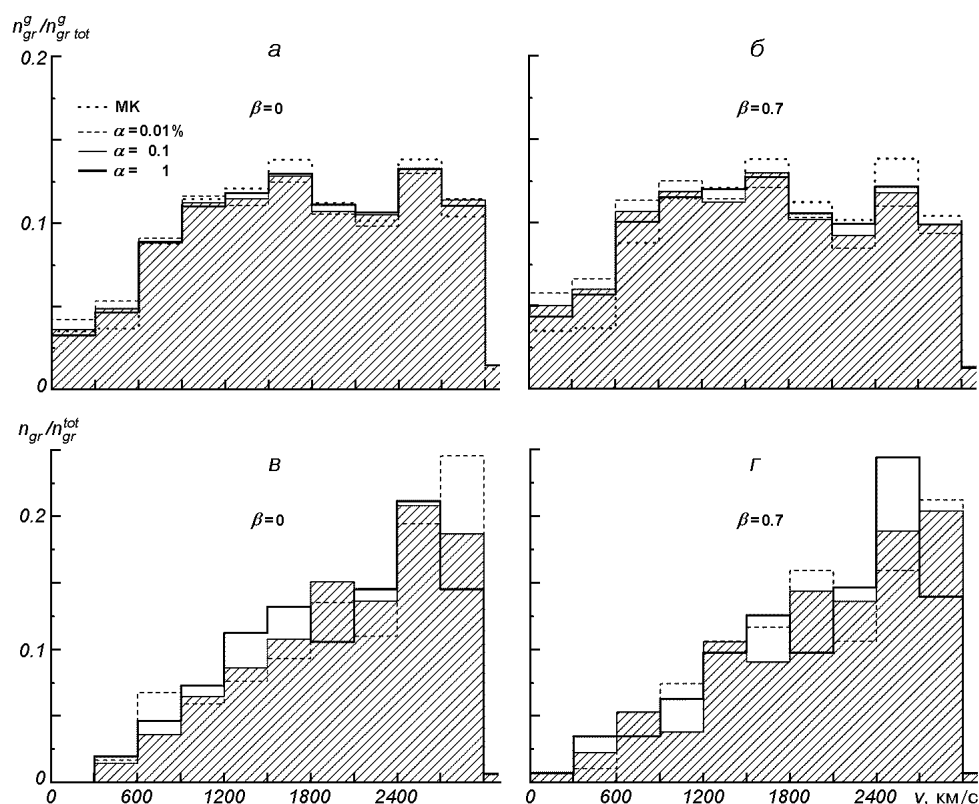


Рис. 9. Распределение галактик в группах МК и подвыборках МЭВ по лучевой скорости: а — при  $\beta = 0$ , б — галактики при  $\beta = 0.7$ , в, г — то же для совпавших групп МК и МЭВ

Доля галактик, попавших в группы МК населенностью от 2 до 10 компонентов, составляет 39 %, более 10 компонентов — 14 % (всего 53 % кластеризованных). В группы МЭВ при  $\beta = 0$ ,  $\alpha = 0.01, 0.1, 1$  % численностью от 2 до 10 компонентов попали соответственно 26, 28, 30 % галактик от общего числа, в более населенные ( $> 10$  компонентов) — соответственно 10, 18, 28 %.

Это свидетельствует о том, что метод Вороного слабо зависит от параметра  $\beta$ , а с увеличением  $\alpha$  число галактик в богатых структурах увеличивается намного быстрее, чем в малочисленных. В целом метод Караченцева более склонен выделять малонаселенные группы, а метод Вороного — наоборот, более населенные. Поэтому и общее количество групп МК и МЭВ отличается в среднем на 300 (см. табл. 3).

На рис. 9, а, б представлены распределения галактик сравниваемых групп по лучевой скорости. Видно, что распределение галактик в подвыборках МЭВ хорошо согласуется с аналогичным распределением галактик в группах МК, т. е. в данном случае селекции по глубине сверхскопления нет. Количество же совпавших групп больше на периферии сверхскопления (рис. 9, в, г). Одно из объяснений заключается в том, что на расстоянии примерно 1200 км/с находится сильный аттрактор — скопление галактик в Деве. Поэтому выделение групп в этой многонаселенной области сильно зависит от метода и параметров кластеризации и требует дополнительной информации об индивидуальных характеристиках галактик. По этой причине в скоплении Дева наименьшее количество групп МК и МЭВ совпадает всеми компонентами.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Мы применили 3D-метод мозаики Вороного для выделения групп галактик в Местном Сверхскоплении и сравнили полученные группы с группами МК [15], используя один и тот же каталог галактик МС ( $N = 7064$ ).

3D-метод Вороного — это геометрический метод, основанный только на положениях галактик в пространстве. Метод выявляет области с повышенной плотностью галактик по сравнению с фоном (т. е. контраст плотности по сравнению со случайным распределением). Поскольку каталог МС неоднородный (есть сильная селекция карликовых галактик с глубиной), мы выполнили искусственное перемасштабирование расстояния таким образом, чтобы концентрация галактик с глубиной выборки изменялась по степенному закону с таким же показателем  $\beta$ , как и для полного однородного каталога. Метод Караченцева, в свою очередь, — динамический, который учитывает индивидуальные свойства галактик. Он основан на предположении о круговых кеплеровских движениях компонентов группы вокруг главной (наиболее массивной) галактики, граница группы — это так называемая ее поверхность нулевой скорости [3, 12].

Анализ размеров ячеек Вороного в МС показал, что чем строже ограничивать каталог галактик по  $M_{\text{abs}}$ , тем больше утрачивается информация о распределении реальных групп. Яркие галактики слабо отслеживают распределение групп галактик полного каталога. Распределение самых ярких галактик  $M_{\text{abs}} < -20.5^m$  ближе к случайному (но не соответствует случайному), однако мы бы хотели подчеркнуть, что такой эффект в распределении галактик может зависеть не от их светимости, а от их количества: чем меньше галактик, тем слабее они сгущаются (см. рис. 5, 6).

Мы отождествили группы МЭВ, полученные 3D-методом Вороного при разных параметрах кластеризации ( $\alpha$  и  $\beta$ ), с группами МК, выделенными динамическим методом. Количество групп МЭВ и групп МК, которые полностью совпали всеми компонентами, составляет 22 %, что вполне приемлемо. Например, при сравнении иерархического и перколяционного методов совпало 25 % групп [6]. Поскольку 3D-метод мозаики Вороного впервые был применен для решения такого рода задачи, это общее статистическое совпадение применения различных методов свидетельствует о правомерности его использования для выделения групп галактик. При этом невозможно сделать вывод о том, какие значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$  наиболее оптимальны, поскольку для разного количества компонентов в группе наибольшее число совпадений приходится на разные значения параметров  $\alpha$  и  $\beta$ . Метод мозаики Вороного слабо зависит от параметра  $\beta$ , а с увеличением  $\alpha$  число галактик в богатых структурах увеличивается намного быстрее, чем в малочисленных. Сравнение совпавших групп, полученных разными методами кластеризации для одной и той же выборки галактик МС, показывает, что метод Караченцева более склонен выделять малонаселенные группы, а метод мозаики Вороного — наоборот, более населенные. Преимущество метода мозаики Вороного заключается в его простоте, поскольку необходимо знать только координаты и скорости галактик, тем самым метод может быть полезным при предварительном (первоначальном) исследовании структуры сверхскопления или когда нет информации об индивидуальных особенностях галактик. Важное значение имеет также способ «перемасштабирования» расстояния, поскольку после его применения можно использовать любой другой геометрический метод кластеризации. Определение физических характеристик групп галактик важно и для выяснения структуры МС, и для оценки отношения масса—све-

тимостью, поскольку является уникальным источником данных о распределении скрытой материи на масштабах 0.1...1 Мпк [12]. При этом, при сравнении кинематических и динамических характеристик групп галактик качество исходной выборки и критерий отбора в группы имеют определяющее значение для выбора той или иной модели распределения скрытой массы [1, 2]. Это свидетельствует о том, что целесообразно использовать несколько методов для выделения структуры сверхскопления галактик, поскольку в комплексе они дают весомое подспорье в наблюдательных программах поиска и идентификации членов физически связанных групп.

Авторы благодарны Д. И. Макарову и И. Д. Караченцеву за предоставление каталога галактик МС до его публикации, а также за полезные дискуссии.

Работа поддержана грантом Ф7/267-2001 Государственного фонда фундаментальных исследований Министерства образования и науки Украины.

1. *Вавилова И. Б., Караченцева В. Е., Макаров Д. И., Мельник О. В.* Триплеты галактик Местного Сверхскопления. 1. Кинематические и вириальные свойства // Кинематика и физика небес. тел.—2005.—**21**, № 1.—С. 3—20.
2. *Караченцева В. Е., Мельник О. В., Вавилова И. Б., Макаров Д. И.* Триплеты галактик Местного Сверхскопления. 2. Вириальные и суммарные массы // Кинематика и физика небес. тел.—2005.—**21**, № 3.—С. 217—230.
3. *Тихонов А. В., Макаров Д. И.* О корреляционных свойствах галактик Местного сверхскопления // Письма в Астрон. журн.—2003.—**29**, № 5.—С. 334—342.
4. *Binggeli B., Popescu C. C.* Dwarf galaxies in the Virgo cluster. III. Flattening distribution // *Astron. and Astrophys.*—1995.—**298**, N 1.—P. 63—75.
5. *Einasto J., Klypin A. A., Saar E., Shandarin S. F.* Structure of superclusters and supercluster formation. III. Quantitative study of the Local Supercluster // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1984.—**206**, N 2.—P. 529—558.
6. *Garsia A. M.* General study of group membership. II. Determination of nearby groups // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1993.—**100**.—P. 47—90.
7. *Geller M. J., Huchra J. P.* Groups of galaxies. III. CfA survey // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1983.—**52**.—P. 61—87.
8. *Girardi M., Rigoni E., Mardirissian F., Mezzetti M.* Morphology and luminosity segregation in nearby loose groups // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**406**, N 2.—P. 403—414.
9. *Giuricin G., Gondolo P., Mardirossian F., et al.* Groups of galaxies in the Local Supercluster: some hypotheses of the evolutionary stage // *Astron. and Astrophys.*—1988.—**199**, N 1.—P. 85—90.
10. *Giuricin G., Marinoni C., Ceriani L., Pisani A.* Nearby optical galaxies. Selection of the sample and identification of groups // *Astrophys. J.*—2000.—**543**, N 1.—P. 178—194.
11. *Karachentseva V. E., Vavilova I. B.* Clustering of low surface brightness dwarf galaxies in the Local Supercluster // *Dwarf galaxies: ESO Conf. and Workshop Proceedings / Eds G. Meylan, P. Prugniel.*—1994.—N 49.—P. 91—100.
12. *Karachentsev I.* Criterion for bound groups of galaxies. Application to the Local Volume // *Astron. and Astrophys. Transactions.*—1994.—**4**.—P. 1—35.
13. *Karachentsev I. D., Makarov D. I.* The Galaxy motion Relative to Nearby Galaxies and the Local Velocity Field // *Astron. J.*—1996.—**111**, N 2.—P. 794—803.
14. *Kiang T.* Random Fragmentation in Two and Three Dimensions // *Zeitschrift fur Astrophysik.*—1966.—**64**.—P. 433—439.
15. *Makarov D. I., Karachentsev I. D.* A new catalog of multiply galaxies in the Local Supercluster // *ASP Conf. Ser.*—2000.—**209**.—P. 40—46.
16. *Paliagro A., Antonuccio-Delogu V., Becciani U., Gambera M.* Substructure recovery by three dimensional discrete wavelet transforms // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1999.—**310**, N 3.—P. 835—841.
17. *Ramella M., Boschin W., Fadda D., Nonino M.* Finding galaxy clusters using Voronoi tessellation // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**368**, N 3.—P. 776—786.
18. *Ramella M., Geller M. J., Pisani A., da Costa L. N.* The UZC-SSRS2 group catalog // *Astron. J.*—2002.—**123**, N 6.—P. 2976—2984.
19. *Tully R. B.* The Local Supercluster // *Astrophys. J.*—1982.—**257**, N 2.—P. 389—422.
20. *Tully R. B.* Nearby galaxies catalog. II. An All-Sky survey within 3000 kilometers per second // *Astrophys. J.*—1987.—**321**, N 1.—P. 280—304.

21. *Tully R. B.* Light-to-mass variations with the environment // *Astrophys. J.*—2005.—**618**, N 1.—P. 214—226.
22. *van de Weygaert R.* Fragmenting the Universe. III. The construction and statistics of 3-D Voronoi tessellations // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**283**, N 2.—P. 361—406.
23. *Vaucouleurs G. De.* The Local Supercluster // *The Large Scale Structure of the Universe: Proceedings of the Symp., Tallin, Estonian SSR, September 12—16, 1977* / Eds M. S. Longair, J. Einasto. — Tallin, 1978.—P. 205.—(IAU Symposium, N 79).
24. *Vavilova I. B.* Cluster and wavelet analysis for detachment of the structure of cluster of galaxies: comparison // *Data Analysis in Astronomy* / Eds V. di Gezu et. al. — Singapore: World Scientific Publ., 1998.—P. 297—302.
25. *Vavilova I., Melnik O.* Voronoi tessellation for galaxy distribution // *Proceedings of the Institute of Mathematics of National Academy of Science of Ukraine.*—2005.—**55**.—P. 203—212.
26. *Zaninetti L.* The galaxies distribution as given from the Voronoi Diagrams // *Proceedings of the Institute of Mathematics of National Academy of Science of Ukraine.*—2005.—**55**.—P. 213—218.

Поступила в редакцию 16.02.06