

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ КРУПНОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ ПО ДАНЫМ КАТАЛОГА SDSS DR5 LRG

Н.Л.ВАСИЛЬЕВ

Поступила 18 января 2008

Принята к печати 9 апреля 2008

Проведена оценка корреляционных свойств крупномасштабной структуры распределения красных галактик высокой светимости (Luminous Red Galaxies) по данным пятого выпуска (Data Release Five) обзора Sloan Digital Sky Survey. Описание корреляций на малых масштабах проводится методом распределения расстояний до ближайшей соседней галактики $\alpha(r)$. Метод условной концентрации $\Gamma(r)$ показывает наличие степенной корреляции с показателем степени $\gamma = 1.0 \pm 0.1$ в диапазоне масштабов [1,30] Мпк/н пространства красных смещений. Для больших масштабов [30,200] Мпк/н наблюдается переход от степенного закона к плоскому участку. Однако наличие плоского участка в оценке условной концентрации является только необходимым, но не достаточным условием обнаружения однородности исследуемой выборки. В частности плоский участок может быть вызван присутствием сверхбольших структур (таких как обнаруженные в новейшем сверхглубоком обзоре COSMOS), приводящих к систематическому сдвигу оценки условной плотности. Дополнительно для масштабов [1,200] Мпк/н обсуждается поведение редуцированной двухточечной корреляционной функции $\xi(r)$. Для малых масштабов, где $\xi(r) \gg 1$, наклоны редуцированной корреляционной функции и условной концентрации совпадают.

Ключевые слова: *Вселенная: крупномасштабная структура: обзор SDSS: корреляционный анализ: фракталы*

1. *Введение.* Проблема количественного описания крупномасштабной структуры (кластеризации) распределения галактик в последние годы широко обсуждалась, особенно в связи с появлением новых трехмерных обзоров галактик: Two degree Field Galaxy Redshift Survey (2dFGRS) [1] и Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [2]. Появление этих новых наблюдательных данных отражает значительный прогресс в наших знаниях о локальной Вселенной; например, количество измеренных красных смещений выросло в десятки раз по сравнению с предыдущими обзорами, выполненными в последние два десятилетия. Кроме того, точное измерение красных смещений и многополосная фотометрия позволяют достоверно оценить многие важные параметры и эффекты (например, K -поправки), которые были лишь приблизительно известны вплоть до нескольких последних лет. Стоит, однако, заметить, что для некоторых видов анализа, таких, в том числе, как обсуждаемые здесь, наличие большого непрерывного телесного угла обзора является крайне важным. Это требование можно считать лишь

частично выполненным для данных доступных к настоящему моменту, но ожидается, что, например, финальная версия обзора SDSS предоставит данные на достаточно большой непрерывной области небесной сферы уже в ближайшем будущем (2009г.).

При проведении исследования крупномасштабной структуры Вселенной методологические проблемы являются ключевыми для получения истинных количественных характеристик пространственного распределения галактик. Основной проблемой является то, что получаемые из наблюдений оценки статистических величин могут быть искажены различными эффектами, обусловленными как систематическими ошибками используемых статистических методов, так и ограниченностью объемов исследуемых выборок (см. анализ искажающих факторов в работах [3-5]). В последних публикациях, посвященных проблеме анализа крупномасштабной структуры, рассматриваются два метода анализа двухточечных корреляций: двухточечная корреляционная функция $\xi(r)$ и методы условной концентрации $\Gamma(r)$ и $\Gamma^*(r)$. Подробное описание истории и примеров использования методов корреляционного анализа для исследования различных выборок галактик приведено в работе [5].

Данная работа посвящена корреляционному анализу выборки ярких красных галактик (Luminous Red Galaxies, LRG) каталога SDSS и является продолжением изучения распределений галактик, представленного в работах [6] и [7]. Анализу корреляционных свойств выборки LRG каталога SDSS посвящены такие ранее опубликованные работы, как, например, [8] и [9]. Отличия данной работы от вышеперечисленных заключаются в том, что исследуется более новый каталог Data Release Five, а также приводятся и сравниваются результаты методов условной концентрации и двухточечной корреляционной функции. Кроме того, в данной работе обсуждается вопрос о необходимых и достаточных условиях обнаружения масштаба перехода к однородности в распределении галактик во Вселенной.

Описание структуры данной работы приведено ниже. В первую очередь в разделе 2 описывается построение полных по объему подвыборок, для которых далее выполняется количественный анализ крупномасштабной структуры. В разделе 3 проводится исследование корреляций на малых масштабах с использованием статистики распределения расстояний до ближайшей соседней галактики. Далее в разделах 4 и 5 применяются методы условной концентрации и двухточечной корреляционной функции, соответственно, приводится обсуждение полученных результатов. Наконец, в разделе 6 подводятся итоги, делаются выводы и даются планы для дальнейшей работы.

2. *Полные по объему подвыборки.* Обзор SDSS (<http://www.sdss.org>) в настоящее время является крупнейшим спектроскопическим обзором внегалактических объектов и одной из наиболее амбициозных наблюдательных программ, когда-либо выполнявшихся как в истории внегалактических

наблюдений, так и наблюдательной астрономии в целом. Финальный каталог SDSS обзора (декабрь 2008г.) будет включать более одного миллиона измеренных красных смещений, представляя максимально полную к настоящему времени карту локальной Вселенной глубиной до нескольких сотен Мпк/г (а также информацию о трехмерном распределении некоторых видов более далеких объектов, таких как квазары).

В данной работе рассматривается последний публично доступный на момент подготовки работы выпуск каталога SDSS, Data Release Five (DR5), который представлен в глобальной сети по адресу <http://www.sdss.org/dr5> [10] и содержит информацию о красных смещениях для 675 тысяч галактик и 90 тысяч квазаров. Область небесной сферы, на которой проведен спектроскопический обзор и измерены красные смещения, составляет 5740 квадратных градусов (большая часть объектов расположена вблизи северного полюса галактической системы координат). Галактики, представленные в обзоре SDSS, разделены на две независимые группы объектов: основная выборка галактик (Main Galaxy Sample, MGS) и яркие красные галактики. В данной работе рассматривается только последний тип объектов, подобный анализ для основной выборки галактик (MGS) был представлен ранее в работе [7].

2.1. Критерии выбора объектов. Для построения запроса на выборку нужных объектов из базы данных SDSS DR5 [10] использовались перечисленные ниже критерии. Во-первых, накладывалось ограничение на флаги (поля в базе данных SDSS), указывающие принадлежность объектов к нужной выборке (LRG). Во-вторых, устанавливались ограничения на красные смещения $0.16 < z < 0.6$ (нижняя граница выбрана согласно [9]; пояснения по особенностям отбора объектов для галактик типа LRG приводятся далее). Кроме того, для красных смещений были приняты ограничения на точность определения: параметр достоверности определения красного смещения имеет значение не менее 0.35, и отсутствуют отметки об ошибках при выполнении измерений. С учетом перечисленных ограничений, общее число отобранных галактик составило 82904.

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЛАСТЕЙ (РЕГИОНОВ) НА НЕБЕСНОЙ СФЕРЕ (λ_{min} , λ_{max} , η_{min} , η_{max}) - ГРАНИЦЫ ОБЛАСТИ НА НЕБЕСНОЙ СФЕРЕ В СОБСТВЕННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ОБЗОРА SDSS, Ω - ТЕЛЕСНЫЙ УГОЛ ОБЛАСТИ

Подвыборка	λ_{min}	λ_{max}	η_{min}	η_{max}	Ω
R1VL	-48.0	48.0	7.0	36.0	0.752
R2VL	-54.0	-17.0	-33.5	-16.5	0.153
R3VL	-13.5	43.0	-36.0	-26.5	0.152

Для дальнейшего анализа были выбраны три непересекающиеся прямоугольные области на небесной сфере, обозначаемые далее как R1, R2, R3 (см. рис.1). При этом, границы выбранных областей были заданы в собственной сферической системе координат обзора SDSS (λ, η) и приведены в табл.1.

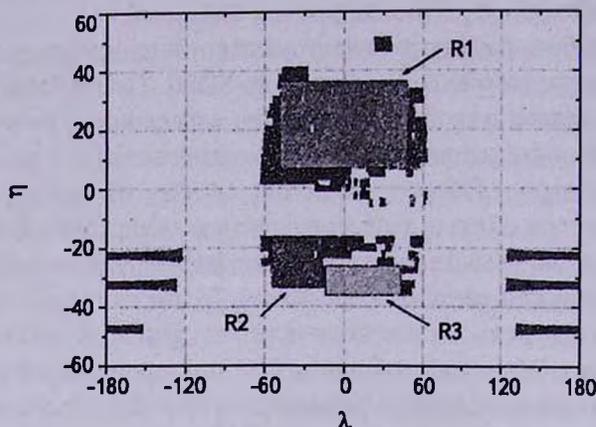


Рис.1. Расположение галактик LRG обзора SDSS на небесной сфере. Границы выбранных для исследования областей R1, R2 и R3 приведены в табл.1.

2.2. Получение полных по объему подвыборок. Для построения полных по объему подвыборок необходимо предварительно вычислить метрические расстояния и абсолютные звездные величины исследуемых объектов. Метрические расстояния до галактик могут быть определены по известным красным смещениям как

$$r(z) = \frac{c}{H_0} \int_{1+z}^1 \frac{dy}{y \cdot (\Omega_M/y + \Omega_\Lambda \cdot y^2)^{1/2}}, \quad (1)$$

где в качестве параметров Ω_M , Ω_Λ использовались значения стандартной космологической модели. Согласно общепринятой практике при исследовании крупномасштабной структуры Вселенной, значение постоянной Хаббла принимается равным $H_0 = 100 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$. В качестве видимых звездных величин в данной работе использовались петросьяновские звездные величины в фильтре g (см. описание фотометрии обзора SDSS в [2] и [10]), исправленные за внутригалактическое поглощение. Абсолютная звездная величина в фильтре g вычисляется как

$$M_g = m_g - 5 \cdot \log_{10} [r(z) \cdot (1+z)] - K_g(z) - 25, \quad (2)$$

где $K_g(z)$ - значение K -поправки в данном фильтре. Для определения K -поправок использовались данные каталога Value Added Galaxy Catalog (VAGC, см. описание в работе [11]). Данный каталог среди прочего содержит данные о K -поправках, вычисленных индивидуально для каждой галактики, в том числе для галактик типа LRG. Последняя версия каталога VAGC на

момент подготовки работы была доступна только для предыдущего выпуска каталога SDSS, Data Release Four (DR4). Для взаимного сопоставления объектов в каталогах SDSS DR5 и VAGC DR4 использовались следующие критерии:

- расстояние между объектами на небесной сфере не превышает 1' дуги;
- разница между красными смещениями в каталогах не превышает 1%.

В результате для 66948 исследуемых галактик LRG были получены красные смещения из каталога VAGC DR4, для оставшихся же 15956 галактик использовалась приближенная формула (полином), полученная аппроксимацией данных VAGC DR4 для найденных галактик:

$$K_g(z) = -0.45 + 6.88 \cdot z - 4.61 \cdot z^2. \quad (3)$$

В данной работе поправки за эволюцию (E -поправки) для галактик не вводились, так как в настоящее время не существует окончательной общепринятой модели эволюции галактик. Ожидаемое изменение светимости галактик LRG (эллиптических галактик высокой светимости) сводится к систематическому увеличению с ростом красного смещения ($E(z) \approx -1$ для $z = 1$), что не должно оказывать существенного влияния на корреляционные свойства выборки.

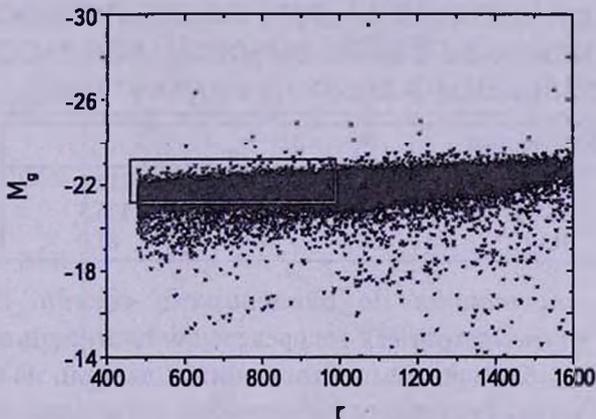


Рис.2. Диаграмма метрических расстояний и абсолютных звездных величин в фильтре g . Прямоугольником выделена область для исследуемых полных (VL) подвыборок.

Традиционно обзоры красных смещений галактик представляют собой выборки полные до данной видимой звездной величины. Иными словами, гарантируется, что для выбранной области небесной сферы в выборке представлены все объекты в некотором интервале видимых звездных величин $m_{\min} < m < m_{\max}$. Однако в отличие от большинства каталогов, таких как SDSS MGS или 2dFGRS, выборка SDSS LRG является псевдополной по объему. Действительно полные по объему выборки гарантируют наличие всех объектов в данном интервале светимостей, таким образом, они не подвержены эффекту радиальной селекции по расстоянию от наблюдателя. В то же время в выборке SDSS LRG объекты в заданном диапазоне светимостей хотя и присутствуют во всем объеме, но их концентрация

систематически уменьшается с увеличением расстояния от наблюдателя, начиная с $z=0.36$ (см. подробное описание, например, в [9]).

Исходя из описанных свойств каталога SDSS LRG, для получения полных по объему подвыборок были выбраны границы расстояний и светимостей, приведенные в [9]:

$$-23.2 < M_g < -21.2,$$

$$0.16 < z < 0.36,$$

где M_g - абсолютная звездная величина в фильтре g . Таким образом, для трех выбранных областей небесной сферы были выделены полные по объему (VL) подвыборки, обозначаемые здесь и далее R1VL, R2VL и R3VL, соответственно. Основные характеристики подвыборок представлены в табл.1 и 2.

Таблица 2

НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛУЧЕННЫХ ПОЛНЫХ ПО ОБЪЕМУ ПОДВЫБОРОК (VL) N_g - КОЛИЧЕСТВО ГАЛАКТИК В ПОДВЫБОРКЕ, r_{np} - ХАРАКТЕРНОЕ РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ БЛИЖАЙШИМИ СОСЕДНИМИ ГАЛАКТИКАМИ, r_g^m - МАКСИМАЛЬНЫЙ РАДИУС СФЕРЫ ПОЛНОСТЬЮ ПОМЕЩАЮЩЕЙСЯ В ОБЪЕМЕ ВЫБОРКИ. ВСЕ РАССТОЯНИЯ ПРИВЕДЕНЫ В Мпк/ h ($H_0 = 100 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$)

Подвыборка	N_g	r_{np}	r_g^m
R1VL	18975	9.3	212.3
R2VL	3961	9.5	136.5
R3VL	3397	10.0	81.0

3. *Метод расстояния до ближайшего соседа.* Рассмотрим величину $\omega(r)$, определяемую как распределения плотности вероятности нахождения точки, ближайшей по отношению к данной, на расстоянии r (величина находится как среднее по ансамблю реализаций дискретного стохастического процесса). Определим величину $\omega(r)dr$ как вероятность того, что для данной точки ансамбля ближайшая соседняя точка лежит в интервале $[r, r+dr]$, т.е. $N(r)=0$ и $N(r+dr) > 0$, где $N(r)$ - количество точек внутри сферы радиуса r . Эта величина должна удовлетворять нормировке

$$\int_0^{\infty} \omega(r)dr = 1. \quad (4)$$

В качестве метода оценки для конечных выборок используется выражение

$$\omega_E(r) = N_{nn} / \int_0^{\infty} N_{nn}(r')dr', \quad (5)$$

где $N_{nn}(r)$ - число точек выборки, для которых ближайшая соседняя точка находится на расстоянии r .

Распределение плотности вероятности обнаружения ближайшего соседа для пуассоновского распределения со средней плотностью $\langle n \rangle$ получено в [4]

$$\omega(r) = 4\pi\langle n \rangle r^2 \cdot \exp\left(-\frac{4\pi\langle n \rangle r^3}{3}\right). \quad (6)$$

Для реальных данных наблюдений (современных обзоров галактик) среднее расстояние между ближайшими соседними галактиками меньше, чем для пуассоновского случая, это является прямым свидетельством наличия корреляций на малых масштабах. Точное аналитическое описание поведения $\omega(r)$ в общем случае распределений с корреляциями, описываемыми степенным законом, неизвестно; приблизительное выражение для случая анизотропного пуассоновского распределения, в котором присутствует радиальный профиль плотности, уменьшающийся как $n_c(r) \sim r^{-\alpha}$ от центра с показателем степени α (для $\alpha > 1.5$ - см. обсуждение в [4]), задается выражением

$$\omega(r) = 4\pi C r^{2-\gamma} \cdot \exp\left(-\frac{4\pi C}{3-\gamma} r^{3-\gamma}\right), \quad (7)$$

где $\gamma = 3 - 2\alpha$. Данное выражение, как оказалось, достаточно хорошо подходит для аппроксимации реальных данных наблюдений (см. рис.3).

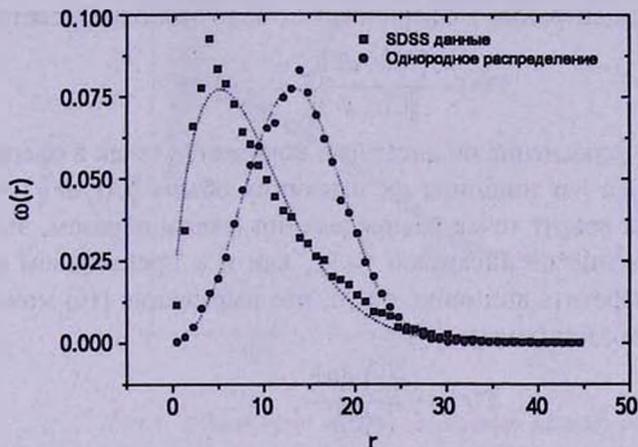


Рис.3. Распределение плотности вероятности расстояния до ближайшего соседа для галактик подвыборки R1VL (квадратики) и для пуассоновского распределения (кружки) с тем же числом точек в том же объеме. Пунктирные линии показывают наилучшие приближения соответственно для анизотропного распределения со степенным профилем плотности (7), со значением $\gamma = 1.4$, и для пуассоновского случая (6).

4. Метод условной концентрации. В общем случае, для распределения точек со значительными флуктуациями концентрации на некоторых масштабах возможна оценка двухточечных корреляций с методом условной концентрации (см. обсуждение в [4]). Ниже сначала приводится краткий обзор основных свойств данного статистического метода, причем внимание уделено значению эффектов конечного объема и статистическим ошибкам, которые они могут привести в оценки. Далее этот метод применяется к данным VL подвыборок, полученным из каталога SDSS LRG (см.

обсуждение в разделе 2).

Интегральная условная концентрация $\Gamma^*(r)$ определяется для ансамбля реализаций стохастического дискретного процесса как

$$\Gamma^*(r) = \frac{\langle N(r) \rangle_P}{\|C(r)\|}. \quad (8)$$

Данная величина измеряет среднее количество точек $\langle N(r) \rangle_P$, содержащихся в сфере объема $\|C(r)\| = (4/3)\pi r^3$, с условием, что центр сферы приходится на одну из точек распределения ($\langle \dots \rangle_P$ таким образом означает условное усреднение по ансамблю).

Оценка интегральной условной концентрации $\Gamma_E^*(r)$ в выборке конечного объема (в предположении стационарности процесса) может быть найдена как

$$\Gamma_E^*(r) = \frac{\overline{N(r)}_P}{\|C(r)\|} = \frac{1}{N_c(r)} \sum_{i=1}^{N_c(r)} \frac{N_i(r)}{\|C(r)\|}, \quad (9)$$

где $N_c(r)$ - количество точек (центров) со сферами, полностью содержащимися в объеме выборки, $\overline{(\dots)}_P$ означает усреднение по всем точкам выборки.

Условная концентрация в сферических оболочках определяется как

$$\Gamma(r) = \frac{\langle N(r, dr) \rangle_P}{\|C(r, dr)\|}, \quad (10)$$

где $\langle N(r, dr) \rangle_P$ - усреднение по ансамблю количества точек в сферических оболочках радиуса r и толщины dr , имеющих объем $\|C(r, dr)\| = 4\pi r^2 dr$, рассматриваемых вокруг точек распределения (таким образом, это также условное усреднение по ансамблю $\langle \dots \rangle_P$, как и в предыдущем случае). Следует также обратить внимание на то, что выражение (10) может быть записано как (см., например, [4])

$$\Gamma(r) = \frac{\langle n(r)n(0) \rangle}{\langle n(0) \rangle}, \quad (11)$$

где $\langle \dots \rangle$ - усреднение по ансамблю (безусловное), а $n(r)$ - локальная средняя концентрация на расстоянии r от данной точки.

Для оценки условной концентрации в оболочках в случае конечной выборки может быть использовано следующее усреднение по объему

$$\Gamma_E(r) = \frac{\overline{N(r, \Delta r)}_P}{\|C(r, \Delta r)\|} = \frac{1}{N_c(r+\Delta r)} \sum_{i=1}^{N_c(r+\Delta r)} \frac{N_i(r, \Delta r)}{\|C(r, \Delta r)\|}, \quad (12)$$

где вновь рассматривается только метод оценки по полностью содержащимся в объеме оболочкам, т.е. по $N_c(r+\Delta r)$ точкам (центрам), сферические оболочки вокруг которых полностью содержатся в объеме выборки; $\|C(r, \Delta r)\| = (4/3)\pi((r+\Delta r)^3 - r^3)$ - объем сферической оболочки.

Важно отметить, что для любой выборки N -точек, расположенной в объеме произвольной геометрической формы, только некоторое подмножество

точек $N_c(r)$ для данного масштаба r будет удовлетворять следующему: рассматриваемая сфера радиуса r вокруг данной точки полностью содержится в объеме выборки. При приближении к радиусу максимальной сферы r_s^m , которая может быть помещена в данную выборку, количество точек, участвующих в усреднении в выражениях (9) и (12), уменьшается. С

Таблица 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ СТЕПЕНИ γ ДЛЯ ПОЛНЫХ ПОДВЫБОРОК. ПРИВЕДЕНЫ ЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ УСЛОВНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ Γ^* И УСЛОВНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ОБОЛОЧКАХ Γ

Подвыборка	r_{min}	r_{max}	γ, Γ^*	γ, Γ
R1VL	0.93	31.5	1.07	0.92
R2VL	0.93	29.8	1.09	0.95
R3VL	0.93	29.8	1.14	1.01

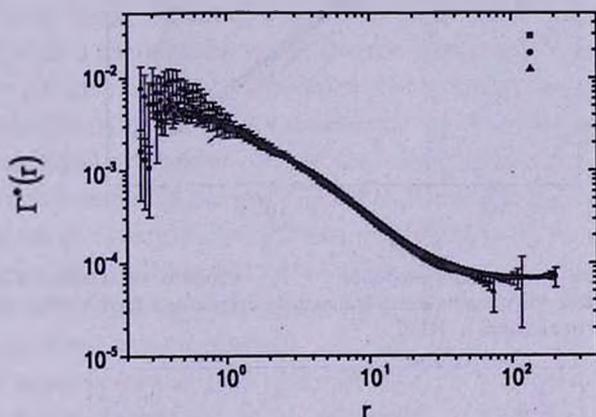


Рис.4. Общий вид $\Gamma^*(r)$ для полных подвыборок.

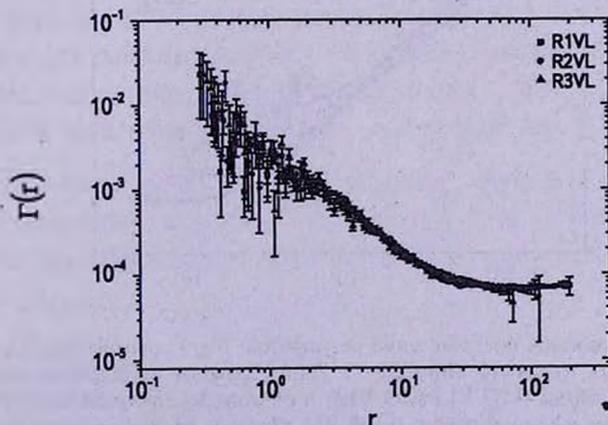


Рис.5. Общий вид $\Gamma(r)$ для полных подвыборок.

другой стороны, для масштабов меньших характерного среднего расстояния между ближайшими соседними галактиками $r_{\text{шп}}$ шум дискретности может существенно влиять на оценки корреляционных свойств [4,5]. Параметры $r_{\text{шп}}$ и $r_s^{\text{шп}}$ для исследуемых подвыборок приведены в табл.2.

Общий вид функций Γ^* и Γ для исследуемых полных подвыборок показан на рис.4 и рис.5, соответственно. Результаты аппроксимации исследуемых функций степенным законом $r^{-\gamma}$ на масштабах 1-30 Мпк/н представлены в табл.3. В результате осреднения полученных величин со значениями телесных углов областей Ω , взятых в качестве весов, получена оценка среднего показателя степени $\gamma = 1.0 \pm 0.1$ (приведена стандартная ошибка для одного измерения γ). На рис.6 отдельно приведена область

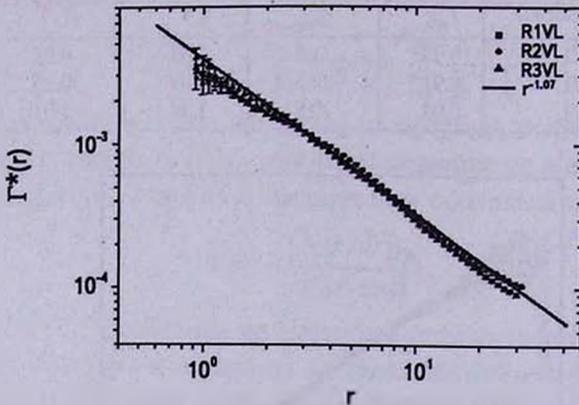


Рис.6. Область масштабов, для которой $\Gamma^*(r)$ хорошо описывается степенным законом. Прямой линией обозначена аппроксимация степенной функции с показателем степени $\gamma = 1.07$ для подвыборки R1VL.

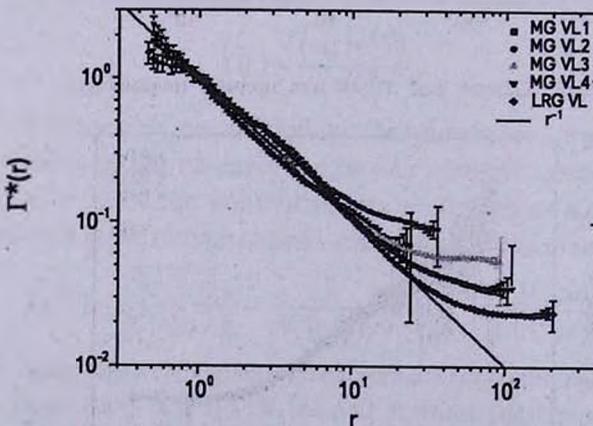


Рис.7. Комбинированное представление результатов $\Gamma^*(r)$ для области R1, нормированных таким образом, что $\Gamma^*(1 \text{ Мпк}/h) = 1$. Даны значения, найденные для галактик выборки DR4 Main Galaxies (MG VL1-MG VL4) в области R1, полученные в [7], а также результаты, полученные в данной работе (LRG VL). Прямой линией обозначена степенная функция r^{-1} .

масштабов, для которых применима аппроксимация функции Γ^* степенным законом. Данный результат можно рассматривать как соответствующий фрактальной модели распределения галактик (см., например, [4]) с фрактальной размерностью $D = 2.0 \pm 0.1$ (где $D = 3 - \gamma$). Общеизвестным фактом в современной статистической физике является то, что степенной характер условной плотности свидетельствует о фрактальности рассматриваемого распределения (хотя и не является достаточным условием для доказательства).

Для меньших масштабов характерно преобладание статистических ошибок, вызванных дискретностью выборки, на фоне степенного закона. Некоторое уменьшение наклона функции на масштабах менее 3 Мпк/х может быть объяснено тем фактом, что величина r_{min} для исследуемых выборок составляет порядка 10 Мпк/х, т.е. преобладанием флуктуаций на малых масштабах.

На масштабах больших 30 Мпк/х наблюдается плавный переход от степенного закона с показателем γ к плоскому участку, а, начиная с масштабов 70-100 Мпк/х, поведение функций Γ^* и Γ может быть рассмотрено как флуктуации относительно постоянных значений. Последний факт может быть интерпретирован как свидетельство наступления однородности в распределении галактик, начиная с масштабов 70-100 Мпк (при $H_0 = 100 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$), что было ранее отмечено в [8] и [12]. Вместе с тем, известным фактом [3,4] является то, что статистически значимая оценка условной плотности может быть получена только для масштабов, в несколько раз меньших радиуса максимальной сферы. В частности наличие в исследуемой выборке гигантских структур (в случае, когда плотность возрастает к дальней границе конусной выборки, на которую приходится наибольшие полные сферы) может привести существенные искажения в оценку условной концентрации, создав, таким образом, плоский участок условной концентрации (или отклонения от степенного закона).

Рис.7 показывает возрастание масштаба перехода условной плотности к плоскому участку с увеличением глубины выборки. На рисунке приведены графики функции $\Gamma^*(r)$ (нормированные таким образом, что $\Gamma^*(1 \text{ Мпк/х})=1$), найденные для галактик выборки DR4 Main Galaxies (MG VL1-MG VL4) в области R1, полученные в [7], также результаты, полученные в данной работе (LRG VL) и степенная функция r^{-1} в качестве опорного значения.

5. *Двухточечная корреляционная функция.* Редуцированная двухточечная корреляционная функция $\xi(r)$ стохастического дискретного процесса определяется (см., например, [13]) как

$$\xi(r) = \frac{\langle n(r)n(0) \rangle}{\langle n(0) \rangle^2} - 1 = \frac{\Gamma(r)}{\langle n \rangle} - 1, \quad (13)$$

где $\langle \dots \rangle$ означает усреднение по ансамблю, а $\langle n \rangle$ - средняя концентрация ансамбля. Последнее равенство следует из определения условной плотности

согласно выражению (10).

Существует несколько методов оценки (оценочных функций) для $\xi(r)$, в качестве ссылок можно порекомендовать работы [14] и [4], в которых приводятся детальные обсуждения различных оценочных функций, используемых в публикациях. Наиболее часто используемым при анализе крупномасштабной структуры распределения галактик методом оценки в настоящее время является метод Лэнди-Шалого (Landy & Szalay estimator, LS), поскольку он дает наименьшую статистическую ошибку для случая однородных (пуассоновских) распределений. Данный метод основан на подсчетах пар объектов выборки и случайных вспомогательных точек, однородно распределенных в объеме выборки. Оценочная функция данного метода представляется как ([14]):

$$\xi_{LS}(r) = \frac{N_R(N_R-1)}{N_D(N_D-1)} \frac{DD(r)}{RR(r)} - 2 \frac{N_R-1}{N_D} \frac{DR(r)}{RR(r)} + 1, \quad (14)$$

где N_D - количество точек данных (объектов выборки); N_R - количество вспомогательных (случайных) точек, однородно распределенных внутри объема выборки; $DD(r)$ - число пар точек данных, расположенных на расстоянии r друг от друга (пары учитываются дважды), $DR(r)$ - число пар данных точек с вспомогательными, $RR(r)$ - число пар вспомогательных точек (пары учитываются дважды).

Аналогично методу оценки условной концентрации, в котором учитываются сферические оболочки, полностью содержащиеся в объеме данной выборки, можно определить метод полных сферических оболочек (Full Shell estimator, FS) для оценки $\xi(r)$, который следует напрямую из выражения (13)

$$\xi_{FS}(r) = \frac{\Gamma_E(r)}{\bar{n}} - 1, \quad (15)$$

где $\Gamma_E(r)$ - условная концентрация в оболочках, а \bar{n} - средняя концентрация выборки, получаемая делением количества точек на объем.

Отличие метода полных сферических оболочек от методов, основанных на подсчетах пар, таких как метод Лэнди-Шалого, состоит в том, что максимально доступным для анализа является масштаб r_s^m , т.е. радиус максимальной полной сферы, помещающейся в выборке. В то же время, в методы подсчета пар неявным образом входит предположение об однородном характере распределения точек в выборке на больших масштабах и оценки $\xi(r)$ на масштабах больших, чем r_s^m могут не соответствовать реальным свойствам выборки (см. обсуждение в [4]). Метод FS, таким образом, является наиболее консервативным и надежным при исследовании выборок с заранее неизвестными свойствами.

На рис.8 представлен $\xi_{LS}(r)$ для исследуемых подвыборок; на масштабах 1-30 Мпк вид корреляционной функции для различных областей небесной сферы хорошо согласуется. Кроме того, анализ показал, что для данного

диапазона масштабов различия между различными методами оценки корреляционной функции незначительны.

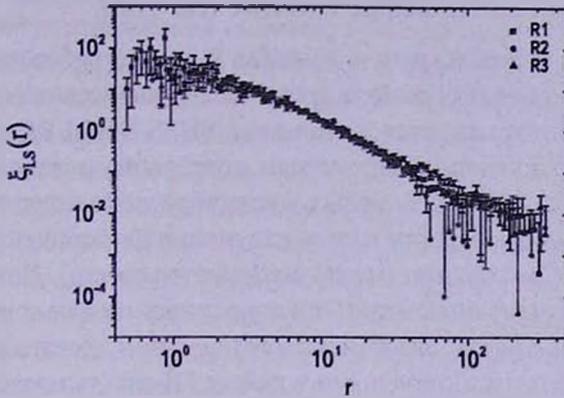


Рис.8. $\xi_{LS}(r)$ для полных подвыборок.

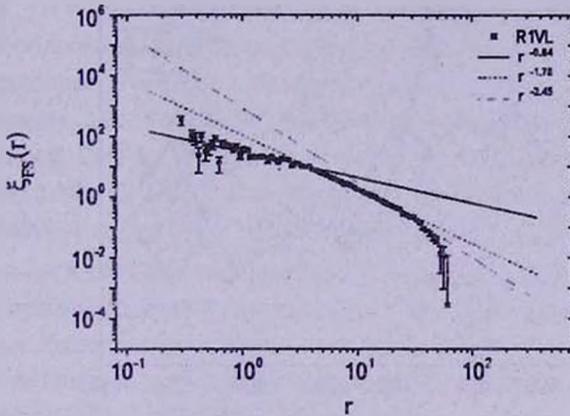


Рис.9. Аппроксимация $\xi_{FS}(r)$ для выборки R1V1L на различных масштабах. На рисунке видно, что функция имеет нестепенной характер и показатель степени (абсолютная величина) возрастает при увеличении масштабов, на которых выполняется аппроксимация

Для малых масштабов, где $\xi(r) \gg 1$, наклоны редуцированной корреляционной функции и условной концентрации совпадают. Необходимо вместе с тем отметить следующий важный факт: согласно выражению (13), функции $\Gamma(r)$ и $\xi(r)$ не могут одновременно иметь степенной вид, если $\Gamma(r)$ описывается степенным законом, то $\xi(r)$ автоматически становится нестепенной (см. подробное обсуждение в работе [6]). На рис.9 продемонстрировано систематическое изменение показателя степени γ при аппроксимации $\xi_{FS}(r)$ на различных масштабах (так показаны полученные значения $\gamma = 0.84$ для 1-4 Мпк, $\gamma = 1.78$ для 4-20 Мпк и $\gamma = 2.45$ для 20-60 Мпк).

Значение параметра корреляционной длины r_0 (определяемого согласно [13] как масштаб, для которого $\xi(r_0) = 1$) слабо зависит от метода

вычисления $\xi(r)$ для всех рассматриваемых областей и находится в интервале [12.3, 15.0] Мпк/н. Это значение r_0 в 2.5-3 раза больше стандартного значения $r_0 = 5$ Мпк/н для обычных галактик (см. [15]).

6. *Обсуждение результатов и выводы.* В данной работе проведено исследование корреляционных свойств трех независимых полных по объему подвыборок, полученных из каталога галактик SDSS DR5 LRG. Рассматриваются различные статистические методы корреляционного анализа на различных масштабах. Так, для малых масштабов используется анализ распределения плотности вероятности обнаружения ближайшей соседней галактики на данном расстоянии (метод ближайшего соседа). Применение метода ближайшего соседа показывает, что корреляции на малых масштабах отличаются от однородного (пуассоновского) случая и достаточно точно описываются выражением, полученным в работе [4] для распределений со степенным профилем распределения плотности.

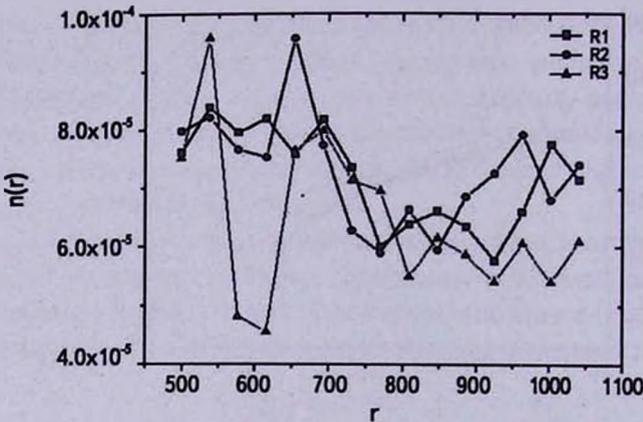


Рис. 10. Концентрация галактик для исследуемых выборок вдоль луча зрения (радиальное распределение). Характерные масштабы систематических изменений концентрации внутри выборок (100-200 Мпк/н) превосходят масштаб предполагаемой однородности.

Метод условной концентрации показывает наличие степенного закона $\Gamma^*(r) \sim r^{-\gamma}$ и $\Gamma(r) \sim r^{-\gamma}$ на масштабах [1,30] Мпк/н в пространстве красных смещений (redshift space). Показатель степени составляет $\gamma = 1.0 \pm 0.1$ (см. табл.3). Этот результат аналогичен полученному в [8]. Присутствующие на малых масштабах отклонения от степенного закона могут быть объяснены тем фактом, что среднее расстояние между ближайшими соседними галактиками $r_{\text{ср}}$ для исследуемых выборок велико и составляет порядка 10 Мпк/н (подробнее влияние возникающего при этом дискретного шума обсуждается в [4]).

Наблюдаемый на больших масштабах ([30,200] Мпк/н) выход функций Γ^* и Γ на плоский участок может свидетельствовать об обнаружении масштабов наступления однородности. Так, например, в [8] и [12] делается вывод об однородности распределения галактик каталога SDSS, начиная с

масштабов 70 и 60 Мпк/ч соответственно (аналогичные выводы для других каталогов приводятся, например, в [16]). Однако в работах [17-19] приводятся радиальные распределения галактик, показывающие (см. методы анализа в [20]) наличие флуктуаций плотности с контрастом в несколько раз на масштабах в сотни Мпк/ч. На рис.10 показан радиальный профиль концентрации галактик для исследуемых выборок, который также показывает наличие систематических изменений плотности на масштабах более 100 Мпк/ч. Подробное обсуждение эффектов конечного объема выборки и вопроса о достоверности получаемых значений дается в [6] и [7].

Метод редуцированной двуточечной корреляционной функции $\xi(r)$ дает результаты, которые в целом хорошо согласуются с полученными в работе [9] (в пространстве красных смещений) для более ранней версии каталога SDSS LRG. На рис.9 приведена аппроксимация $\xi_{FS}(r)$ степенными функциями $r^{-\gamma}$ на различных интервалах масштабов. На масштабах меньших 5 Мпк/ч наклон составляет $\gamma = 0.84$, что согласуется с результатами для $\Gamma(r)$ в пределах ошибок. В области масштаба корреляционной длины r_0 показатель степени $\xi_{FS}(r)$ составляет $\gamma = 1.78$. Эти результаты согласуются с теоретическим предсказанием для точечных распределений со степенной условной концентрацией $\Gamma(r) \sim r^{-\gamma}$. В случае таких распределений корреляционная функция имеет вид $\xi(r) \sim r^{-\gamma}$ для масштабов, на которых $\xi(r) \gg 1$ и $\xi(r) \sim r^{-2\gamma}$ для масштабов $r \sim r_0$ ($\xi(r_0) = 1$, см. формулу (23) в работе [6]).

Автор выражает благодарность Ю.В.Барышеву за идеи, консультации и помощь при написании данной работы. Автор благодарен F.Sylos-Labini за полезные комментарии и предложения, а также за предоставленную возможность совместной работы над данными каталога SDSS в "Istituto dei Sistemi Complessi" (CNR, Рим, Италия).

Астрономический институт СПбГУ им. В.В.Соболева,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: nv@nv5968.spb.edu

LARGE SCALE STRUCTURE CORRELATION ANALYSIS OF SDSS DR5 LRG CATALOG DATA

N.L.VASILYEV

The estimation of the correlation properties of the large scale structure of Luminous Red Galaxies distribution obtained from the Fifth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey is discussed. The small scale correlations are characterized through the determination of the nearest neighbor distance probability distribution $\omega(r)$. The conditional number density $\Gamma(r)$ shows a power-

law behavior with exponent $\gamma = 1.0 \pm 0.1$ in the range of scales [1,30] Mpc/h of the redshift space. At the larger scales [30,200] the slope changes from the power law towards flat regime. However an existence of the flat regime shall be considered as a necessary but not sufficient condition for the discovery of the homogeneity in the studied sample. In particular the observed flat regime of the conditional density may be caused by a presence of the super-large structures (such as the ones recently detected in the newest ultra-deep COSMOS survey) which lead to the systematic shift in estimation of the conditional density. The behavior of the reduced two-point correlation function $\xi(r)$ is also discussed for the range of scales [1,200] Mpc/h. For the small scales where $\xi(r) \gg 1$ the slopes of the reduced correlation function and conditional number density coincide.

Key words: *Universe:large-scale structure:SDSS survey:correlation analysis: fractals*

ЛИТЕРАТУРА

1. *M.Colless, B.A.Peterson, C.Jackson et al.*, (The 2dFGRS team), astro-ph/0306581, 2003.
2. *D.G.York, J.Adelman, J.E.Anderson et al.*, (The SDSS Collaboration), Astron.J., 120, 1579, 2000.
3. *F.Sylos Labini, M.Montuori, L.Pietronero*, Phys. Rep., 293, 66, 1998.
4. *A.Gabrielli, F.Sylos Labini, M.Joyce, L.Pietronero*, "Statistical physics for cosmic structures", Springer Verlag, 2005.
5. *Ю.В.Барышев, П.Теерикорни*, "Фрактальный анализ крупномасштабного распределения галактик", бюллетень САО РАН, 59, 92, 2006.
6. *N.L.Vasilyev, F.Sylos Labini, Yu.V.Baryshev*, Astron. Astrophys., 447, 431, 2006.
7. *F.Sylos Labini, N.L.Vasilyev, Y.V.Baryshev*, Astron. Astrophys., 465, 23, 2007.
8. *D.W.Hogg, D.J.Eisenstein, M.R.Blanton et al.*, Astrophys. J., 624, 54, 2005.
9. *I.Zehavi, D.J.Eisenstein, R.C.Nichol et al.*, Astrophys. J., 621, 22, 2005.
10. *J.K.Adelman-McCarthy, M.A.Agüeros, S.S.Allam et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., 172, 634, 2007.
11. *M.R.Blanton, D.J.Schlegel, M.A.Strauss et al.*, Astron. J., 129, 2562, 2005.
12. *А.В.Тихонов*, Письма в Астрон. ж., 32, 11, 721, 2006.
13. *Ф.Э.Пиблс*, "Структура Вселенной в больших масштабах", Мир, М., 1983.
14. *M.Kerscher, I.Szapudi, A.S.Szalay*, Astrophys. J., 535, L13, 2000.
15. *P.J.E.Peebles*, astro-ph/0103040, 2001.
16. *А.В.Тихонов, Д.И.Макаров, А.И.Копылов*, Бюллетень САО РАН, 50, 39, 2000.
17. *J.R.Gott III, M.Jurić, D.Schlegel et al.*, Astrophys. J., 624, 463, 2005.
18. *R.Massey, J.Rhodes, A.Leauthaud et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., 172, 239, 2007.
19. *I.Appenzeller, R.Bender, A.Böhm et al.*, The Messenger, 116, 18, 2004.
20. *N.V.Nabokov, N.Yu.Lovvyagin, Yu.V.Baryshev*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., (in preparation).