

## Введение

Гамма-всплески, которые являются одними из самых мощных источников во Вселенной, видны на очень больших расстояниях: красные смещения достигают  $z \approx 8$ . Таким образом, эти объекты могут использоваться в качестве маркеров крупномасштабных структур во Вселенной (скоплений и сверхскоплений галактик). Ранее поиск крупномасштабных структур проводился различными авторами с использованием небольших выборок гамма-всплесков, состоящих из 201 объекта [1], 352 объектов [2] и 384 объектов [3]. Авторы использовали методы условной плотности в сочетании с методом попарных расстояний [4]. Было выявлено несколько пространственно изолированных групп гамма-всплесков.

На сегодняшний день общее количество гамма-всплесков увеличилось до примерно 1600 (их количество постоянно растёт), однако красное смещение известно только для небольшой части зарегистрированных событий (обычно красное смещение определяется с помощью спектральных и фотометрических наблюдений галактик-хозяев с использованием крупных наземных и космических телескопов). Именно поэтому исследование крупномасштабных структур с использованием гамма-всплесков проводилось на малых выборках. В настоящее время количество гамма-всплесков с известными красными смещениями составляет около 570. Следовательно, имеет смысл провести дополнительные исследования возможных крупномасштабных структур с использованием этой возросшей выборки объектов.

Данная работа продолжает серию исследований по поиску крупномасштабных структур Вселенной с использованием метода ближайших соседей в сочетании с методом парных расстояний на основе пространственного расположения гамма-всплесков. С помощью алгоритма кластеризации DBSCAN выявлено несколько пространственно разделённых групп источников. Обсуждается поиск возможных кросс-корреляций с пространственным распределением галактик.

## Алгоритм кластеризации

Поиск кластеров был выполнен с использованием известного и на данный момент самого популярного алгоритма кластеризации DBSCAN (Density-based spatial clustering of applications with noise, [6]).

Этот алгоритм рассматривает кластеры как области с высокой плотностью точек (объектов). Между этими областями должны присутствовать области с низкой плотностью (или пустоты). С таким подходом кластеры могут иметь любую форму, что отличает алгоритм DBSCAN от других алгоритмов, распознающих повышенные плотности распределения точек. DBSCAN находит основные объекты, которые расположены в областях с высокой плотностью. Таким образом, кластер — это совокупность основных объектов, расположенных близко друг к другу (расстояние измеряется с использованием некоторой метрики), и набор неосновных объектов, которые находятся рядом с основными, но не являются основными сами по себе.

В алгоритме используются два параметра:  $N_{\min}$ , минимальное количество объектов, определяющих кластер, и параметр  $\epsilon$ , который определяет, что считается повышенной плотностью точек по сравнению с фоновым уровнем. В нашем поиске мы используем  $N_{\min} = 3$  и  $\epsilon = 400$  Мпк.

## Результаты

Результат работы алгоритма поиска кластеров DBSCAN представлен в таблице ниже. Диаметр кластера (или размер кластера) вычисляется как максимальное расстояние между элементами в кластере. В правом столбце этой таблицы указаны ранее известные крупномасштабные структуры Вселенной. В результате нашего поиска обнаружены 4 кластера, которые ранее не были известны.

Кластер	RA	DEC	z	Диаметр, Мпк	$N_{\text{GRB}}$	Отождествление
1	15 <sup>h</sup> 52 <sup>m</sup> , 16 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup>	+16°16', +27°35'	0.25-0.41	602.0	4	
2	00 <sup>h</sup> 02 <sup>m</sup> , 00 <sup>h</sup> 54 <sup>m</sup>	-02°56', +09°14'	0.55-0.71	631.4	5	Tesch-Engels LQG <sup>1</sup>
3	01 <sup>h</sup> 52 <sup>m</sup> , 23 <sup>h</sup> 01 <sup>m</sup>	-56°09', +50°44'	0.01-0.16	1221.2	18	Laniakea Supercluster <sup>2</sup>
4	21 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup> , 22 <sup>h</sup> 01 <sup>m</sup>	+26°12', +42°16'	0.37-0.48	632.2	5	
5	22 <sup>h</sup> 25 <sup>m</sup> , 23 <sup>h</sup> 26 <sup>m</sup>	-57°01', -55°08'	0.68-0.82	551.9	3	Webster <sup>3</sup>
6	08 <sup>h</sup> 06 <sup>m</sup> , 08 <sup>h</sup> 57 <sup>m</sup>	+37°16', +47°00'	0.59-0.62	534.0	3	
7	00 <sup>h</sup> 21 <sup>m</sup> , 00 <sup>h</sup> 49 <sup>m</sup>	+19°30', +22°36'	0.83-0.94	446.6	3	
8	03 <sup>h</sup> 18 <sup>m</sup> , 03 <sup>h</sup> 49 <sup>m</sup>	-46°24', -46°01'	1.38-1.44	456.0	3	KKL <sup>4</sup> LQG 5

<sup>1</sup> Large Quasar Group [9]

<sup>2</sup> [10]

<sup>3</sup> [8]

<sup>4</sup> Komberg-Kravtsov-Lukash [7]

Таким образом, были выявлены четыре уже известные крупномасштабные структуры и обнаружены четыре новые структуры. Масштабы структур составляют сотни мегапарсек и достигают гигапарсека.

## Каталог Гамма-всплесков

Выборка из 570 гамма-всплесков с известными красными смещениями получена из каталога [5], доступного онлайн. Для нашего анализа попарных расстояний достаточно использовать три столбца из этого каталога: прямое восхождение (RA), склонение (DEC) и красное смещение z. Входная таблица выглядит следующим образом:

GRBa	RA	DEC	z	
0	240419A	1.650500	-0.785689	5.1780
1	240414A	3.225150	0.990183	1.8330
2	240402B	4.283692	0.450295	1.5510
3	240315C	2.472113	-0.166679	4.8590
4	240225B	2.241948	0.479675	0.9460
...	...	...	...	...
565	980425	5.126468	-0.922087	0.0085
566	971214	3.126321	1.137955	3.4200
567	970828	4.749405	1.034980	0.9578
568	970508	1.804089	1.383872	0.8350
569	970228	1.317505	0.205483	0.6950

Входные данные прямого восхождения, склонения и красного смещения были преобразованы в декартовы координаты (в Мпк) с использованием следующих параметров стандартной космологической модели (СКМ):  $H_0 = 70$  км с<sup>-1</sup> Мпк<sup>-1</sup> (постоянная Хаббла),  $\Omega_m = 0.3$  (плотность барионной материи),  $\Omega_\Lambda$  (плотность тёмной энергии).

## Литература

- [1] Raikov, A.A., Orlov, V.V., Beketov, J.B. (2010), *Astrophysics*, 53, 396-408.
- [2] Gerasim, R.V., Raikov, A.A., Orlov, V.V., (2015), *Astrophysics*, 58, 204-215 DOI 10.1007/s10511-015-9376-7.
- [3] Shirokov, S.I., Raikov, A.A., Baryshev, Yu.V., *Spatial Distribution of Gamma-Ray Burst Sources* (2017) *Astrophysics*, 60, 484. DOI: 10.1007/s10511-017-9500-y.
- [4] Raikov, A.A., Orlov, V.V., (2011), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* (2011) 418, 2558-2564. doi:10.1111/j.1365-2966.2011.19645.x.
- [5] Swift GRB Table: Myers, J.D., Cenko B., Reddy F. (2023) NASA Goddard Space Flight Center, Online GRB Catalogue: [https://swift.gsfc.nasa.gov/archive/grb\\_table/](https://swift.gsfc.nasa.gov/archive/grb_table/).
- [6] Ester, M., H. P. Kriegel, J. Sander, and X. Xu, *A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise*, (1996) In Proc. 2nd Intern. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining, Portland, OR, AAAI Press, 226-231.
- [7] Komberg, B.V., Kravtsov, A.V., Lukash, V.N., *The search and investigation of the Large Groups of Quasars* (1996) *MNRAS*, 282, 713-722. DOI: 10.1093/mnras/282.3.713.
- [8] Webster, A., *The clustering of quasars from an objective-prism survey* (1982) *MNRAS*, 199, 683-705. DOI: 10.1093/mnras/199.3.683.
- [9] Clowes, R. G., *Large Quasar Groups - A Short Review* (2001) In *The New Era of Wide Field Astronomy*, ASP Conference Series, Vol. 232. Ed. R. Clowes, A. Adamson, G. Bromage. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 108-113.
- [10] Tully, R. B., Courtois, H., Hoffman, Y., Pomarède, D., *The Laniakea supercluster of galaxies*, (2014) *Nature*, 513, 71-73. DOI: 10.1038/nature13674.