

Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»
Кафедра теоретической астрофизики

Костенков Александр Евгеньевич

НАБЛЮДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ LBV ЗВЕЗД

Отчет по семинару

Научный руководитель:
профессор А. Ф. Холтыгин

Санкт-Петербург

2015

Оглавление

1.	Введение	3
2.	Поиск LBV-звезд	4
2.1.	Обобщение каталогов	4
2.2.	Наблюдательные данные	5
2.3.	Отбор звезд с H_α -эмиссией	6
2.4.	Сравнение с другими каталогами	7
3.	Статистика распределения LBV-звезд	8
3.1.	Способы и схемы обработки каталогов звезд	8
3.2.	Метод звездных подсчетов	10
3.3.	Матричная обработка данных	11
3.4.	Обработка изображения по каталогу	12
3.5.	Вывод	14
	Список литературы	15

1. Введение

Яркие голубые переменные (LBVs)—одна из наименее понятных стадий в эволюции массивных звезд. Трудности в понимании этих объектов определяются как малочисленностью известных LBV- звезд, их разнообразием, сильной спектральной и фотометрической переменностью [1, 2], так и неточным знанием их фундаментальных параметров. Очевидно, что массивная звезда может проявить себя как LBV после стадии O-звезды Главной Последовательности и перед стадией поздней WR-звезды азотной последовательности (WNL).

Однако, более точное положение LBV-звезд в переходе OV к WNL пока неясно [3]. Весьма вероятно, что стадия LBV и соответствующие этой стадии неустойчивости ветров определяется содержанием водорода в атмосфере звезды. Однако, как определение содержания водорода, так и точное определение светимости и температуры звезды задача нелегкая. Определение фундаментальных параметров массивных звезд в близких галактиках, например в богатой массивными звездами галактике M33, может быть более уверенным чем в нашей Галактике, так как расстояния до галактик измерены с достаточной точностью.

У LBV-звезд наблюдаются сильные изменения блеска и спектра при примерно постоянной болометрической светимости. Характерные времена такой глобальной переменности составляют месяцы—годы. При увеличении визуального блеска LBV-звезды температура фотосферы понижается до 9000 - 10000 К, размер фотосферы звезды увеличивается, это высокое/холодное состояние. Здесь и далее под фотосферой мы понимаем “псевдофотосферу”, то есть то место в ветре звезды, где формируется наблюдаемое континуальное излучение. При понижении визуального блеска температура заметно возрастает до 35000 К или даже выше [1, 2, 4], размер звезды уменьшается, это низкое/горячее состояние. В горячем состоянии спектры LBV весьма похожи на спектры WNL-звезд, однако, истинные звезды типа WN7/8/9 отличаются от LBV в низком/горячем состоянии рядом спектральных особенностей [3, 6], и низким содержанием водорода.

Так называемые переходные (in transition или “slash”) звезды типа Ofpe/WN9, выделенные в отдельный класс звезд Walborn [7], похожи на звезды LBV в низком/горячем состоянии. Ofpe/WN9-звезды характеризуются смешанным спектром с эмиссионными линиями Of и WNL звезд. На примере двух галактических звезд типа LBV AGCar и He

3-519, которые в низком/горячем состоянии соответствовали типу Ofpe/WN9, Smith, Crowther and Prinja [6] предложили продление WNL-классификации до WN10 и WN11.

Тем не менее, до сих пор остается открытым вопрос, отличаются ли истинные звезды LBV в низком/горячем состоянии от самых поздних звезд WN9/10/11. Другими словами, возможно ли, что все звезды самых поздних типов WNL являются звездами LBV, которые за время их наблюдений (всего несколько десятков лет) не проявили сильной переменности блеска. Такие звезды, которые можно подозревать в принадлежности к типу LBV, принято называть спящими (dormant) LBV. Заметим, что спящие LBV-звезды могут быть не только среди звезд типа WNL. Две классические звезды LBV, η Car и P Cyg, сейчас имеют спектр OB-гипергигантов, переменность их блеска мала. Однако, несколько сот лет назад у них наблюдались гигантские вспышки (giant eruptions) [1]. Если бы не эти гигантские поярчания η Car и P Cyg и не знаменитая туманность вокруг звезды η Car, сейчас мы не смогли бы заподозрить их в принадлежности к классу LBV.

Известно два LBV-объекта, у которых за последние годы наблюдались переходы типа LBV к WNL. Это LBV-звезда AGCar в нашей Галактике и LBV-звезда V532 в галактике M33. Известен также один обратный переход, WN3 to WN11(LBV) to WN4/5, это WR-компонент в массивной двойной WR-системе HD5980 в галактике SMC. Исследование таких звезд особенно важно. Очевидно, что параметры этих звезд можно определить наиболее надежно, т. к. при кардинальных изменениях их спектров, ни химический состав, ни величина межзвездного поглощения света (в каком-то приближении и болометрическая светимость) не меняются. По исследованиям LBV-звезд во время таких переходов, вероятно, можно сделать вывод о связи истинных LBV и WNL-звезд.

2. Поиск LBV-звезд

2.1. Обобщение каталогов

В обзоре Humphreys и Davidson [1] сделано обобщение всех данных, известных о LBV-звездах на тот момент: к списку подтвержденных LBV в галактике M 33 были отнесены Var B, Var C, Var 2, Var 83 и к кандидатам V 532 (GR 290, “звезда Romano” [8]). LBV-статус последней позднее был подтвержден спектрально [9] и фотометрически [10]. Звезду Var A в галактике M 33 сейчас принято классифицировать как холодный

гипергигант. Хотя она также показывает все особенности, свойственные LBV-звездам: в 1950–1953 гг. звезда внезапно увеличила свой блеск и была одной из самых ярких в М 33 со спектром класса F, но в настоящий момент звезда имеет нетипичный для классических LBV спектральный класс M. Однако, учитывая немногочисленность изученных LBV-звезд, известные классические состояния LBV [1] вполне могут не исчерпывать всех свойств этих объектов. Как по светимости (массе), так и по переменной блеска звезда Var A полностью соответствует классу LBV.

Поиск LBV-звезд в галактике М 33 проводился разными методами разными группами авторов. В качестве основного метода используется поиск H_α -источников, совпадающих со звездами ранних спектральных классов. Хотя LBV-звезды не обязательно должны быть голубыми объектами, многие работы акцентировались на поиске именно звезд ранних спектральных классов. Некоторые работы были направлены на поиск объектов, подобных SS 443. Спектр SS 433 подобен спектрам поздних WR-звезд. Новый шаг в исследование массивного звездного населения галактики М 33 был сделан группой Massey et. al [11]. Используя ПЗС-изображения галактики, был составлен фотометрический каталог 146622 звезд до 23 звездной величины с точностью 1–2 %, содержащий измерения в широкополосных фильтрах. В следующей работе этой группы был представлен список эмиссионных звезд в галактиках Местной группы, включая и галактику М 33.

2.2. Наблюдательные данные

Группа из САО (А. Ф. Валеев, О. Н. Шолухова, С. Н. Фабрика) проводила поиск LBV-звезд в галактике М33 путем отбора звезд с H_α -эмиссией. Из архива научных данных NOAO (<http://www.archive.noao.edu/nsa/>) были взяты все изображения галактики М 33 после первичной редукции и с нанесенной сеткой координат из работы [12]. Наблюдения проводились на 4-м телескопах обсерваторий KPNO и СТЮ в фильтрах UBVRi и узкополосном (50 Å) - фильтре в октябре 2000 года и сентябре 2001 года. В качестве приемника использовалась мозаика из 8 ПЗС детекторов размерами 2048*4096 пикселей каждая. Поле зрения каждого изображения 36*36 , масштаб (после процедур первичной редукции и исправления дисторсии) равен 0.26/pix. Галактика М 33 была разделена на 3 зоны и каждая зона снималась по 5 раз с небольшим сдвигом, чтобы заполнить зазоры между ПЗС матрицами в мозаике. В нашей работе было использовано

но по 15 мозаичных изображений в каждом фильтре. Подробнее о данных и первичной редукции см. в [11].

2.3. Отбор звезд с H_α -эмиссией

После этапа фотометрии отбирались эмиссионные кандидаты. Строилась зависимость $V - H_\alpha$, где большая часть объектов попадает в широкую полосу линейной зависимости (Рис. 1). Эмиссионные объекты располагались выше этой зависимости, из-за заметного превышения потока в H_α относительно остальной неэмиссионной части выборки объектов. Пример зависимости $V - H_\alpha$ показан на рисунке 1. Очевидно, что эта линейная “основная последовательность” обусловлена тем, что более яркая звезда в полосе V является также более яркой в полосе H_α . Основная последовательность достаточно широкая. Это связано как с наличием абсорбционных звезд, так и со спектральными особенностями звезд разной температуры. Но, тем не менее, она очень хорошо определяется. На следующем этапе из всей выборки 2075 объектов для дальнейшей работы использовались только 707 объектов с $B - V < 0.35$. На Рис. 1 представлены именно эти звезды. Если всю выборку не разделить на данном этапе на красные и голубые звезды, то на графике $V - H_\alpha$ будет наблюдаться две частично перекрывающиеся параллельные последовательности. Это связано с наличием красных звезд в М 33, а также фоновых звезд Галактики.

Для отбора эмиссионных звезд на графике $V - H_\alpha$ была использована следующая методика. Через все точки выборки проводилась прямая. Таким образом находилась основная последовательность неэмиссионных звезд, а затем вычислялось среднеквадратичное отклонение (далее σ) точек от этой линейной зависимости. На следующем этапе из последовательности выбрасывались объекты с превышением по H_α -величине более 2.5σ , проводилась новая последовательность, находилось новое значение σ по оставшимся точкам. После 7-8 итераций количество звезд в выборке не менялось, и было вычислено итоговое значение σ для ректифицированной основной последовательности.

Для выбора минимального превышения, выше которого объекты следует считать эмиссионными, был выбран объект $H_\alpha 7$, имеющий эмиссионную линию H_α с эквивалентной шириной 3 Å, в этом случае имеет превышение над основной последовательностью в 1.01σ (номер 018246). Поэтому превышение для эмиссионных объектов должно со-

ставлять $> 1.0\sigma$, и по указанному критерию было отобрано 185 объектов.

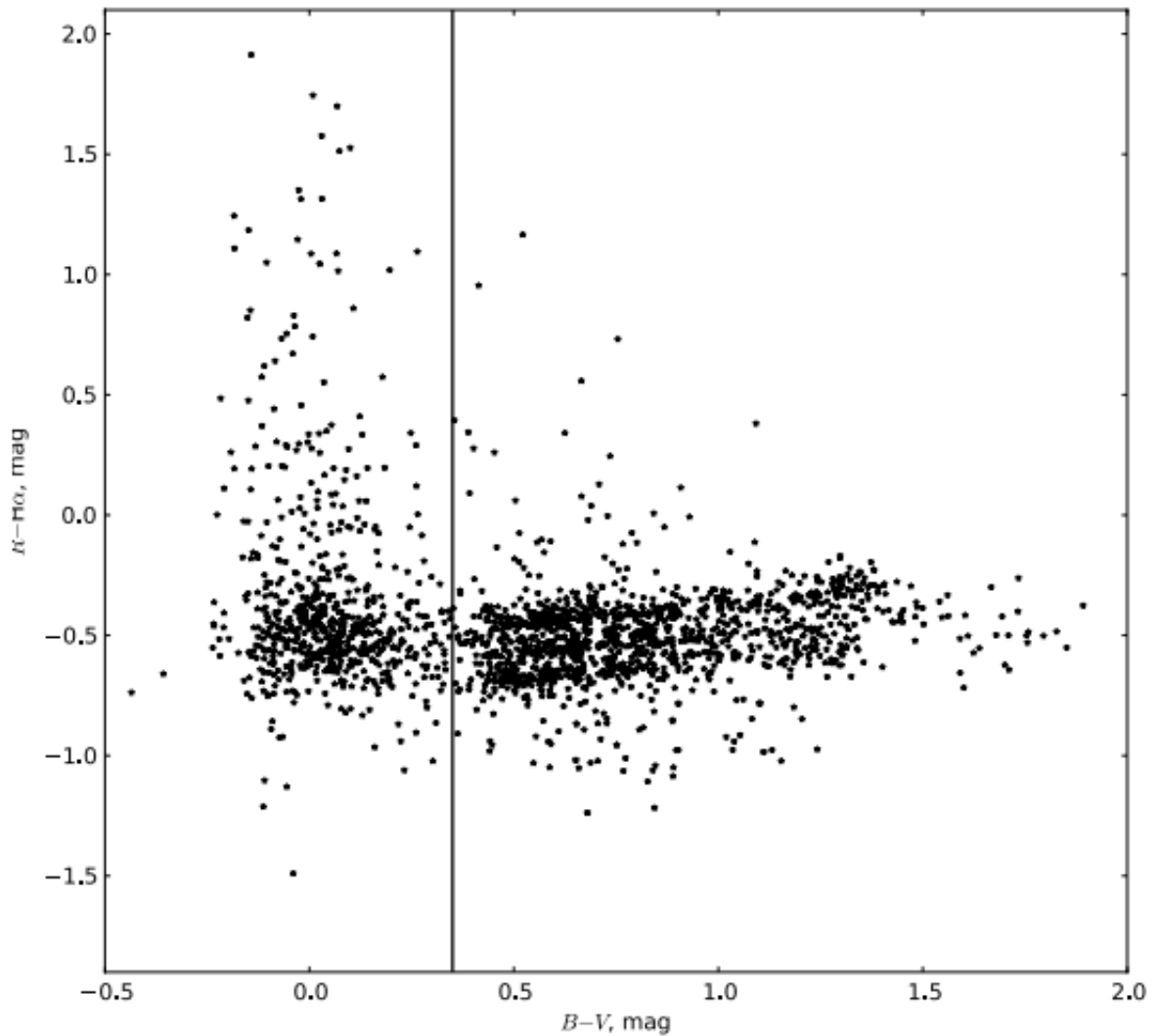


Рис. 1. Изменение звездной величины в фильтре H_α с изменением звездной величины в фильтре V для 707 объектов. Пунктирными линиями показаны уровни 1σ

2.4. Сравнение с другими каталогами

Одним из свойств классических LBV-звезд является переменность блеска на разных временных шкалах, поэтому была проведена кросскорреляция с каталогом переменных звезд в галактике M 33 и найдено, что 29% голубых кандидатов списка имеют переменность блеска. Часть LBV-звезд являются горячими звездами и должны излучать в ультрафиолетовом диапазоне. Сравнение со списком ультрафиолетовых источников показало, что 23 голубых кандидата в LBV-звезды действительно были детектированы космическим телескопом UIT. Список кандидатов в голубые эмиссионные объекты

на 27% совпадает со списком [13], полученным по фотометрическим изображениям с использованием подобных простых критериев.

3. Статистика распределения LBV-звезд

Современные методы небесной механики (N-body simulation) предлагают следующую модель: на стадии образования скопления, плотный центр выбрасывает звезду, и она начинает удаляться от скопления. Для того, чтобы проверить эту теорию, использовались методы математической статистики для отождествления скоплений и поиска LBV-звезд рядом с ними. Из каталога звезд галактики M33 (около 150000 звезд, Massey) были выделены скопления и затем нанесены на карту вместе с LBV-звездами. Для этого существует несколько способов.

3.1. Способы и схемы обработки каталогов звезд

Модель заключается в том, что каждая звезда представляет собой точку с координатами (α, δ) , надо выделить их скопления (повышение плотности) локально, то есть надо учитывать, что это может быть скопления на фоне области с повышенной плотностью (например, рукава или центр нашей галактики). На рис.2 приведено схематическое изображение галактики M33 по точкам. Как видно, в центре и по рукавам концентри-

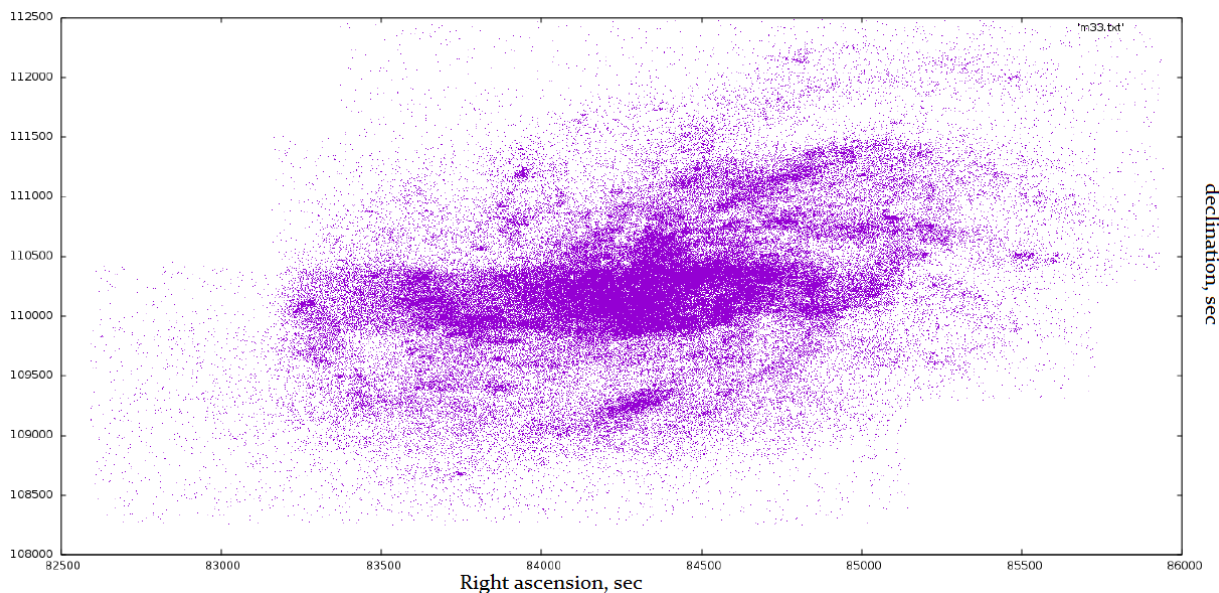


Рис. 2

руется огромное количество звезд и работать с такими данными неудобно, большую их

часть составляет «шум» от звезд $>22-23$ звездной величины. В работе они не рассматривались, весь каталог был поделен по звездным величинам (например, 18-20 и так далее). Была выделена категория наиболее интересных для исследования звезд – голубых ($B-V < 0.5$) ярче 22-ой звездной величины. Например, на рис.3 точки соответствуют звездам от 18 до 20 величины. Если мы отождествим локальное повышение плотности хотя бы в 2 интервалах, то это с большой вероятностью будет скопление. Для самой

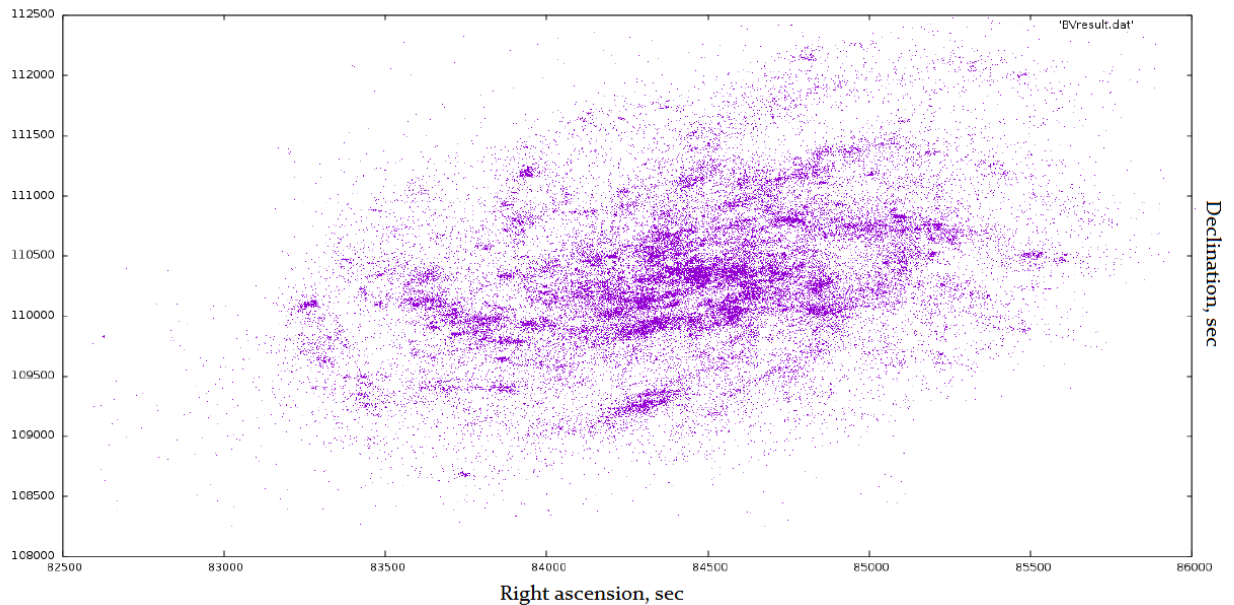


Рис. 3

обработки были использованы следующие методы: метод звездных подсчетов с выборкой по σ , обработка карт распределения плотности с помощью матричных фильтров (Гаусс, Лаплас), Фурье анализ данных. Проверка выборки осуществлялась с помощью уже известных скоплений и LBV-звезд в М33. Ниже приведены положения LBV звезд (рис 4, 5) На изображениях отмечены потенциальные скопления, находящиеся рядом с LBV.

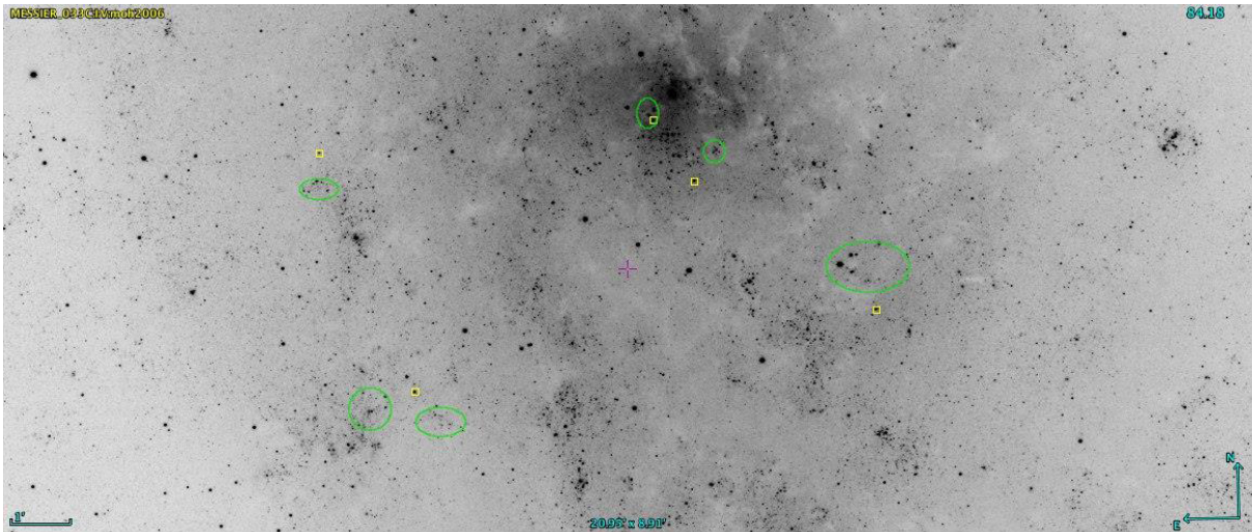


Рис. 4

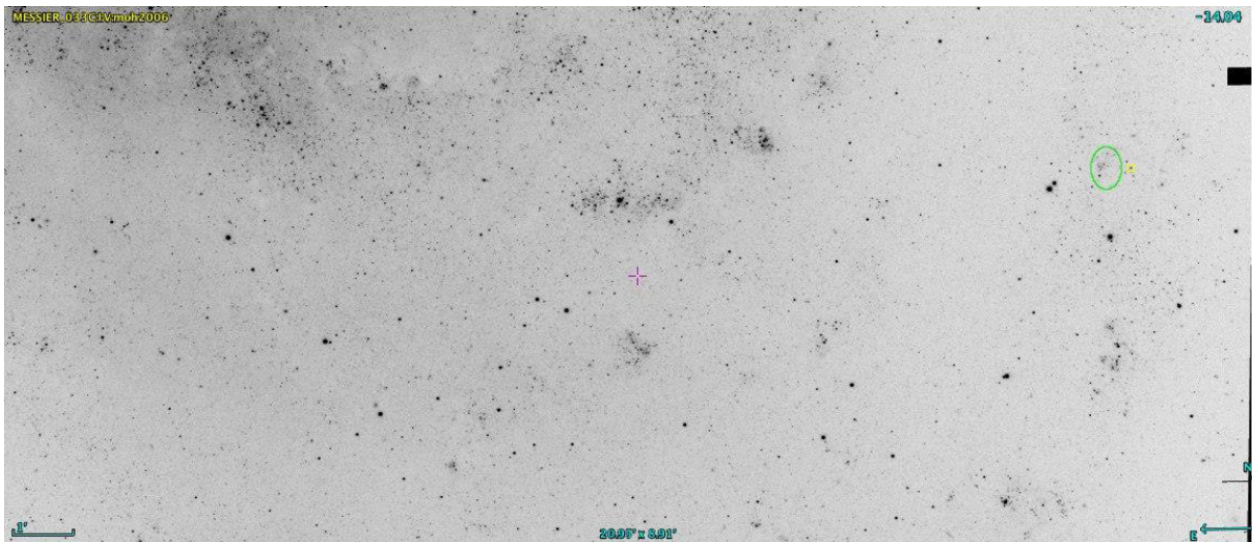


Рис. 5

3.2. Метод звездных подсчетов

Первый способ заключается в том, чтобы поделить нашу карту на участки и посчитать количество звезд в каждом из них, а затем посчитать среднеквадратическое отклонение этой величины от значений окружающих ее участков (например, в данном случае брали участок 3×3 с центром в определяющей клетке). Затем просто брали все участки с большими σ , например, где отклонения > 5 , и нанесли на карту вместе с нашими LBV-кандидатами. В работе карта была поделена по участкам размером 10 , это оптимально, чтобы в каждой клетке было не более одного скопления. Программа написана на Fortran, Python (время работы порядка n^2), для визуализации использовался

GNUPLOT, Matlab. На рис.6 представлены результаты работы программы с $\sigma > 5$, на карту так же нанесены LBV-звезды. Как видно на рисунке, можно отождествить

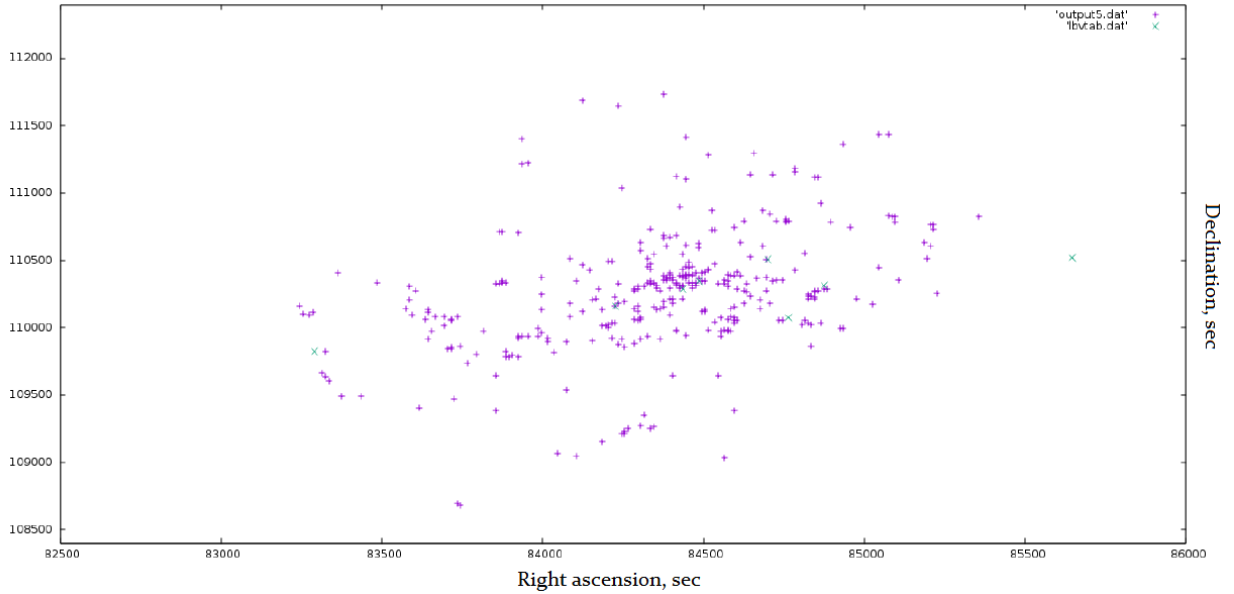


Рис. 6

скопления, но проблемной областью в этом методе являются центральные области, где присутствуют большие образования высокой плотности, разброс σ большой, особенно на границах. Тем не менее программа работает в других областях вполне корректно и найти скопления вполне вероятно перебирая значения σ . Для того, чтобы уточнить результаты, надо обратиться к другим методам, например, матричной фильтрации или Фурье анализу.

3.3. Матричная обработка данных

Обработка данных для выделения различных характеристик является стандартной задачей теории обработки изображений. Изображение представляет собой матрицу $f = [m, n]$, где m, n размер изображения в пикселях, а f – информация о пикселе (интенсивность, яркость и т.д.). Матрица свертки – матрица коэффициентов, которая «умножается» на значение пикселей изображения для получения требуемого результата. С помощью различных ядер матрицы свертки можно получить разные результаты – ядро Гаусса, Лапласа. Так, например, маска Гаусса формируется так (пик соответствует максимуму распределения Гаусса):

$$h_g = e^{-(r^2+c^2)/(2\sigma^2)} \quad (1)$$

$$h(r, c) = \frac{h_g(r, c)}{\sum_{r=1}^M \sum_{c=1}^N h_g(r, c)} \quad (2)$$

Матрица имеет примерно такой вид:

0,000789	0,006581	0,013347	0,006581	0,000789
0,006581	0,054901	0,111345	0,054901	0,006581
0,013347	0,111345	0,225821	0,111345	0,013347
0,006581	0,054901	0,111345	0,054901	0,006581
0,000789	0,006581	0,013347	0,006581	0,000789

Она сглаживает изображение (то есть отбрасывает какие-то сильно отклоняющиеся значения – определенные в маске σ). Так же существуют высокочастотные фильтры, предназначенные для выделения перепадов во всех направлениях. Например, фильтр Лапласа:

$$h = \frac{4}{(a+1)} \begin{bmatrix} \frac{a}{4} & \frac{1-a}{4} & \frac{a}{4} \\ 1-a & -1 & 1-a \\ \frac{a}{4} & \frac{1-a}{4} & \frac{a}{4} \end{bmatrix} \quad (3)$$

3.4. Обработка изображения по каталогу

Задача - убрать фон звезд, в том числе в центре и в рукавах (широкий фильтр Гаусса). Оставить локальное увеличение плотности в выбранных участках, отождествить их со скоплениями. Для начала определим как мы будем работать с каталогом звезд (координаты точек). Здесь использован следующий прием: карта поделена на мелкую сетку, так чтобы в каждом участке было не более 10 звезд (например, на 100x100 участков). В итоге, наша функция $f(m, n)$ изображения и есть количество звезд в клетке (пикселе) с координатами m, n . Это необходимо в рамках нашей модели для обработки изображения. А теперь применим широкий фильтр Гаусса (крупная маска), выделим пики с помощью преобразования Лапласа (рис. 7).

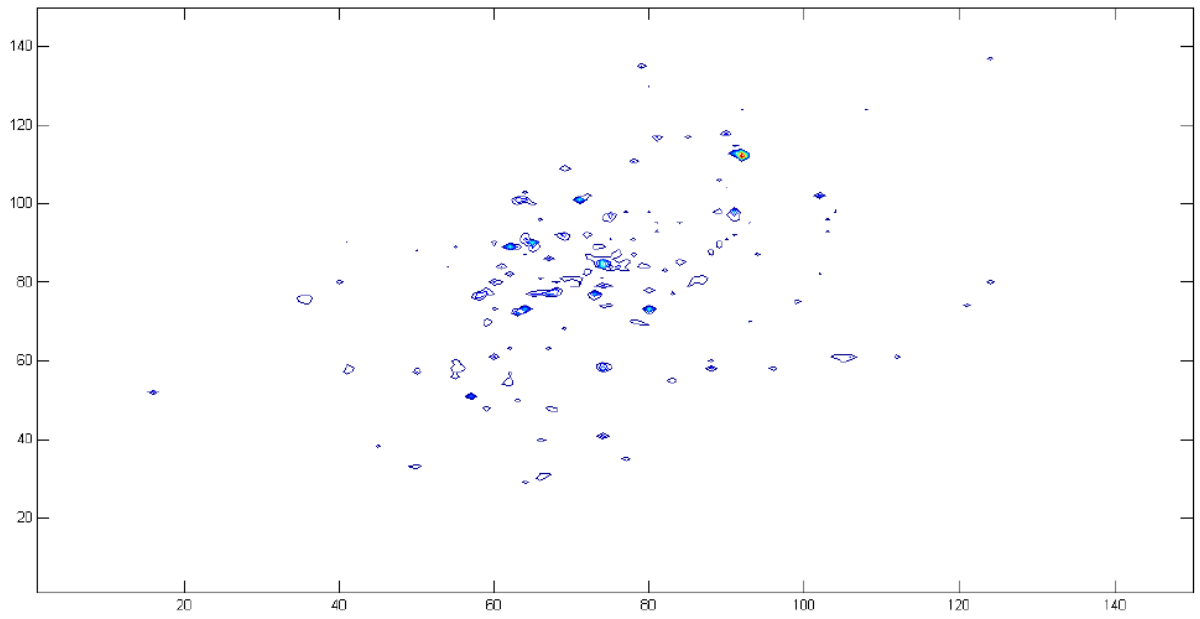


Рис. 7. Проекция скоплений в относительных координатах на сетке 150x150

Если в нашу область попадает скопление, то мы выделяем ее, как область с повышенной плотностью. Рассмотрим область рядом с LBV (рис. 8). Мы хорошо видим, как выделяется скопление на этой карте. И можем сравнить его положение с LBV.

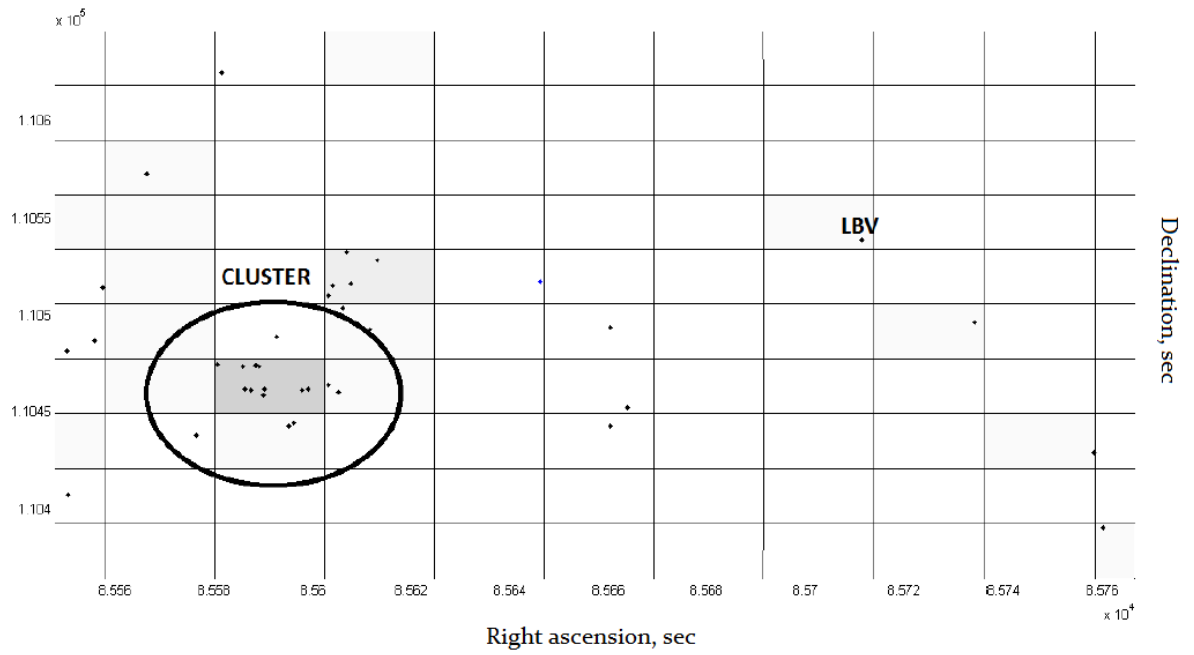


Рис. 8

3.5. Вывод

В данном исследовании проведено моделирование скоплений МЗЗ методами математической статистики (подсчет, матричные фильтры, Фурье анализ). Составлены карта плотности распределения звезд галактики. Были выделены скопления звезд и проведено сравнение с уже известными. Были отождествлены скопления рядом с известными LBV-звездами. Не все скопления можно отождествить только используя статистику из каталога, поэтому далее предполагается использование расположение областей H_{α} , а также фильтрация и Фурье анализ снимков самой галактики.

Список литературы

1. R. M. Humphreys and K. Davidson, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* 106, 1025 (1994).
2. A. M. van Genderen, *Astronom. and Astrophys.* 366, 508 (2001).
3. N. Smith and P. S. Conti, *Astrophys. J.* 679, 1467 (2008).
4. T. Szeifert, *LIACo* 33, 459 (1996).
5. J. S. Clark, V. M. Larionov, and A. Arkharov, *Astronom. and Astrophys.* 435, 239 (2005).
6. L. J. Smith, P. A. Crowther, and R. K. Prinja, *Astronom. and Astrophys.* 281, 833 (1994).
7. N. R. Walborn, *Astrophys. J.* 215, 53 (1977).
8. G. Romano, *Astronom. and Astrophys.* 67, 291 (1978).
9. S. Fabrika, in *Thermal and Ionization Aspects of Flows from Hot Stars*, Ed. by H. Lamers and A. Sagar, *ASP Conf.* 204, 57 (2000).
10. R. Kurtev, O. Sholukhova, J. Borissova, and L. Georgiev, *Rev. Mex. Astron. Astrof.* 37, 57
11. P. Massey, K. A. G. Olsen, P. W. Hodge, et al., *Astronom. J.* 131, 2478 (2006).
12. P. Massey, R. T. McNeill, K. A. G. Olsen, et al., *Astronom. J.* 134, 2474 (2007). (2001)[arXiv:astro-ph/0102020].
13. S. Fabrika and O. Sholukhova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* 43, 149 (1997).
14. Fionn Murtagh, Jean-Luc Starck, *Handbook of Astronomical Data analysis* (Springer, 2006, second edition).
15. Гонсалес Р., Вудс Р., *Цифровая обработка изображений*. — М.: Техносфера, 2005, 2006.