

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ
ОБСЕРВАТОРИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи
УДК 524.423/524.338-31.01/524.3-17

Костенков Александр Евгеньевич

**Исследование звезд предельных светимостей на
промежуточных стадиях эволюции: от наблюдательной
статистики к радиационно-гидродинамическим моделям
ветра**

Специальность 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
А.С. Винокуров

Нижний Архыз — 2026

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Исследование пространственного распределения ярких голубых переменных в галактике M33	16
1.1 LBVs как продукт эволюции двойной системы	16
1.2 Выборка LBVs и LBV-кандидатов	26
1.3 Методы идентификации звездных групп	27
1.4 Результаты	35
1.5 Обсуждение	43
1.6 Выводы главы 1	47
Глава 2. Моделирование оптического и инфракрасного спектров Галактического LBV-кандидата MN112	49
2.1 Галактический LBV-кандидат MN112 и его прототип LBV P Cygni	49
2.2 Наблюдательные данные	50
2.3 Код CMFGEN	50
2.4 Методы определения параметров протяженной атмосферы MN112	52
2.5 Результаты	55
2.6 Обсуждение	67
2.7 Выводы главы 2	68
Глава 3. Оценка фундаментальных параметров звезд и других объектов с мощным оттоком вещества при помощи сеток моделей протяженных атмосфер	70
3.1 Ультраяркие рентгеновские источники	70
3.2 Методы расчета сеток протяженных атмосфер	71
3.3 Наблюдательные данные	75
3.4 Результаты	76
3.5 Обсуждение	83
3.6 Выводы главы 3	85
Глава 4. Ветер и ближайшее звездное окружение спящей яркой голубой переменной Var 2 в галактике M33	86
4.1 Яркая голубая переменная Var 2	86

4.2	Наблюдательные данные	87
4.2.1	Спектральные данные	87
4.2.2	Фотометрические данные	89
4.3	Моделирование протяженной атмосферы	91
4.4	Динамика ветра	99
4.5	Эволюционный статус Var 2	104
4.6	Свойства ветра Var 2	106
4.7	Звездное окружение	108
4.8	Выводы главы 4	111
Заключение		113
Список литературы		115

Введение

Исследование массивных звезд является одним из ключевых компонентов в изучении эволюции межзвездной среды и галактик. Подобные объекты представляют собой основной источник как ионизирующих фотонов, так и тяжелых элементов, выбрасываемых в окружающее пространство с ветром [1, 2], в процессе гигантских выбросов вещества [3, 4] или вспышек сверхновых [5]. На текущий момент многие вопросы эволюции массивных звезд остаются открытыми [6] ввиду их малочисленности и короткого времени жизни [7, 8], а так же сложного влияния физических процессов, таких как вращение и темп потери массы, на последующий эволюционный путь [9–11].

На главной последовательности массивные звезды классифицируются как звезды О и ранних В (В3 и более горячие) классов. В процессе эволюции они становятся сверхгигантами всех видов: голубыми (спектральные классы О, В и А), желтыми (спектральные классы F и G) и красными (спектральные классы К и М). Наиболее массивные звезды ($M_{\text{init}} \gtrsim 20 - 25 M_{\odot}$) эволюционируют в звезды Вольфа-Райе (Wolf-Rayet, WR-звезды) [12], обладающие высоким темпом оттока вещества в виде ветра.

Особый интерес представляют краткосрочные ($\sim 10^4 - 10^5$ лет) промежуточные стадии эволюции массивных звезд, для которых характерны высокий темп оттока вещества в виде ветра и эруптивные выбросы значительной части массы, что в значительной степени определяет их дальнейшую эволюцию [13, 14]. Одним из примеров объектов, находящихся в подобной переходной фазе эволюционного пути, являются яркие голубые переменные (luminous blue variables, LBVs), характеризующиеся иррегулярной фотометрической и спектральной переменностью, а также в некоторых случаях спонтанными гигантскими извержениями вещества [15, 16].

Во время визуального максимума LBVs температура фотосферы падает до 7000 – 8000 K, а темп потери массы возрастает вплоть до $\sim 10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$. В этой фазе спектр звезды идентичен спектрам звезд А-F типов [17]. В минимуме блеска температура звезды может достигать более 25000 K [18]. В этом состоянии спектры LBVs близки к спектрам поздних WR-звезд азотной последовательности с линиями водорода (WNLh). Подобную циклическую переменность с амплитудой блеска до 2.5^m на временах от нескольких лет до десятилетий обычно ассоциируют с яркой голубой переменной S Doradus [15, 19]. Как пра-

вило, для LBVs типичны как значительная переменность типа S Dor [15], так и микропеременность $\lesssim 0.1^m$ типа α Cyg [20], свойственная для большинства горячих сверхгигантов [21].

Предполагается, что наиболее массивные звезды в процессе эволюции попадают в так называемую полосу неустойчивости (LBV instability strip) [22], обусловленную сильным изменением непрозрачности в атмосфере. В совокупности с высокими светимостями данных объектов, близких к пределу Эддингтона [13], изменение непрозрачности приводит к существенным вариациям темпа оттока вещества [9], при этом сами звезды демонстрируют значительную переменность из-за резких флуктуаций оптической толщины протяженной атмосферы [23], чем и объясняется наблюдаемый феномен LBV.

Отдельно стоит упомянуть LBVs, демонстрирующие эруптивные эпизоды в ходе которых их блеск растет более чем на $1\text{--}2^m$ в течение нескольких дней или недель [24, 25], при этом величина темпа оттока вещества может на порядки превышать значения, наблюдаемые вне вспышек [26, 27]. Наиболее ярким примером подобного объекта является η Carinae – одна из самых массивных звезд Млечного Пути [28], в ходе гигантского извержения в 1840-ых годах её светимость на пике достигала $\approx 10^{7.5} L_\odot$ [29, 30], а суммарная масса выброшенного в ходе вспышки вещества превышает $10 M_\odot$ [26, 31]. Природа механизма, порождающего эти извержения, равно как и источник энергии для повышения светимости и выбросов вещества на сегодняшний день не установлены [32].

Между тем, некоторые LBVs сохраняют стабильность в течение десятилетий после активной фазы. Характерным примером "спящей" LBV является галактический голубой гипергигант R Cygni, который с момента гигантских извержений в XVII веке остаётся в относительно стабильном состоянии на протяжении столетий [33, 34]. Такая продолжительная фаза покоя иногда предшествует возобновлению активности [35, 36], однако физическая связь между этими двумя состояниями остаётся неизвестной [37].

В рамках классического сценария эволюции массивных звезд стадия LBV соответствует переходу от горения водорода к горению гелия в ядре, сопровождаемому интенсивным оттоком массы и эпизодическими эруптивными выбросами вещества, которые приводят к потере внешних водородных слоёв [13, 38, 39]. Таким образом, LBVs, предположительно, занимают промежуточное место в эволюции между массивными звёздами Главной последовательности ($M_{\text{init}} \gtrsim$

20-25 $M_{\odot}$) и WR-звездами [16, 40]. Первоначально, в "сценарии Конти" [38, 41] предполагалось, что только звезды с массами $M_{\text{init}} \gtrsim 50 M_{\odot}$ и светимостями светимости $\log L/L_{\odot} \gtrsim 5.8$ могут эволюционировать в LBVs. Однако, наблюдения и теоретические модели указывают на существование менее массивных LBV-звезд с $M_{\text{init}} \approx 20 - 40 M_{\odot}$ и $5.1 \lesssim \log L/L_{\odot} \lesssim 5.6$ [42, 43].

В то же время, некоторые данные указывают, что фаза LBV соответствует заключительной стадии эволюции массивных звезд, непосредственно предшествуя сверхновым типа II_n (supernovae, SN) [44–46]. В зависимости от начальной массы, темпа потери вещества и скорости вращения LBVs могут как эволюционировать в WR-звезды, так и вспыхнуть в виде сверхновой. Было обнаружено, что кривые блеска нескольких сверхновых соответствуют взаимодействию ударной волны с плотным околос звездным веществом, имеющим массу $10 - 20 M_{\odot}$, выброшенным во время извержения LBV-звезд. Например, это наблюдалось в случае SN 2006gy и 2006tf [47, 48]. Также было обнаружено, что прародитель SN 2005gl (тип II_n), отождествляется с очень яркой LBV, а не с RSG [44]. Эти наблюдения подтверждают мнение, что по крайней мере некоторые наблюдаемые LBVs соответствуют конечной точке эволюции, а не переходной фазе.

Также стоит отметить, что ключевую роль в эволюции массивных звёзд играет вращение [10, 49]. LBVs, по крайней мере в нашей Галактике, можно условно разделить на две группы: группа I, состоящая из быстро вращающихся LBVs с сильной переменностью, таких как AG Car и HR Car, и группа II, состоящая из медленно вращающихся, слабо переменных LBVs, например P Cygni и HD 168625 [50]. Вероятно, объекты данных подгрупп могут следовать разными эволюционными путями во время и после фазы LBV и в дальнейшей быть предшественниками различных типов сверхновых.

Альтернативный подход в исследовании LBVs предполагает, что данные объекты являются продуктом эволюции тесных двойных систем с обменом массы [51, 52]. Одним из доводов в пользу данного сценария эволюции является значимая изолированность LBVs и LBV-кандидатов (luminous blue variable candidate, cLBV) относительно звезд О-типа в сравнении с другими массивными звездами [53]. Результат, представленный в работе [53], вызвал активную дискуссию в научном сообществе [54–58]. Выводы различных авторов радикально отличаются среди опубликованных работ во многом ввиду неоднородности сравниваемой звездной выборки, связанной с принципиальной невозможностью

точного отбора массивных голубых звезд по фотометрическим данным [59]. При этом результаты анализа кинематики LBVs/cLBVs и ассоциированных с ними звезд в Млечном Пути [60] и Магеллановых Облаках [61, 62] также разнятся и, возможно, зависят от подтипов рассматриваемых объектов. Исследование LBVs/cLBVs, найденных в галактиках Местного объема, также показало несоответствие возрастов рассматриваемых LBVs/cLBVs и окружающих их звезд [63–65]. На основании вышеизложенного можно заключить, что вопрос о том, являются ли некоторые LBVs промежуточной стадией эволюции одиночной массивной звезды или продуктом эволюции двойной системы остается открытым.

Важнейшим компонентом для проверки различных эволюционных сценариев является определение фундаментальных звёздных параметров. Однако, точное определение параметров звезды (L , T_{eff}^1 , R_* , M_*) и характеристик звездного ветра ($\dot{M}$, v_∞ , β) является непростой задачей ввиду того, что условия в ветре далеки от локального термодинамического равновесия (ЛТР). Надёжные результаты для конкретного объекта можно получить только путём детального моделирования наблюдаемых данных с помощью продвинутого не-ЛТР кода [66–70]. Эта задача особенно сложна в случае исследования звезд предельных светимостей, обладающих плотным ветром [71]. Подобный ветер может полностью скрывать нижние слои атмосферы, формируя так называемую "псевдо-фотосферу" [13, 72]. Дополнительные трудности возникают ввиду того, что для таких объектов темп потери массы и скоростной закон ветра во многом определяют размер данной фотосферы, и, как следствие, эффективную температуру и ионизационный баланс во всей протяженной атмосфере. Наличие столь плотного ветра также ведет к тому, что спектральные линии поглощения, используемые для оценки массы, либо отсутствуют, либо оказываются сильно искажёнными.

Отчасти эти проблемы определения фундаментальных параметров проэволюционировавших массивных звезд могут быть решены с помощью самосогласованных гидродинамических не-ЛТР моделей звёздного ветра. В отличие от стандартных моделей, опирающихся на аналитический профиль скорости ветра, который существенно варьируется в различных исследованиях [73–75], эти модели учитывают баланс радиальных сил в ветре звезды. Тем не менее, зна-

¹ T_{eff} — температура на оптической глубине $\tau = 2/3$

чительная неопределённость в определении звёздных параметров сохраняется из-за неоднородной (клочковатой) структуры звёздных ветров, которая влияет на их профиль плотности и скорости. Эта неоднозначность может быть разрешена в ходе исследования распределения сгустков вещества с радиусом посредством анализа квазиодновременных наблюдений в широком спектральном диапазоне [76–78]. В настоящее время данный подход осуществим лишь для небольшого числа звёзд.

На сегодняшний день гидродинамические не-ЛТР модели представлены в основном для голубых сверх- и гипергигантов [79–81] или WR-звёзд [71, 82, 83], в то время как полноценное самосогласованное не-ЛТР моделирование для LBVs выполнено не было. Сравнение полученных параметров моделей с эволюционными треками может углубить понимание феномена LBV и уточнить современные эволюционные модели наиболее массивных звёзд.

Мощным инструментом в изучении массивных звезд также является анализ их звездного и газового окружения. Согласно современным представлениям, массивные звёзды могут формироваться либо в тесных скоплениях с богатым звёздным и газовым окружением [84–86], либо в изолированных плотных сгустках газа при высоком темпе аккреции на центральный объект, позволяющем преодолеть давление излучения [87–89]. На сегодняшний день известно достаточно большое число примеров массивных звезд, расположенных вдали от скоплений или крупных областей звездообразования (например, [90–93]), однако, вопрос о том является ли они все "убегающими" звездами, выброшенными из скоплений, или некоторых из них были сформированы "in situ", является открытым. Согласно результатам ранних работ [94], ОВ-звёзды редко, если вообще когда-либо, формируются в поле. Современные исследования кинематики и звездного окружения также свидетельствуют преимущественно в пользу сценария выброса массивных звезд из скоплений, нежели их изолированного формирования (см. обсуждение и ссылки в [95, 96]), тем не менее некоторые работы указывают на то, что значительная часть ОВ-звезд могла сформироваться локально [97, 98]. Таким образом, анализ звездной среды позволяет углубить понимание возможных механизмов образования массивных звезд [53]. Более того, возраст звезды, полученный из сопоставления параметров, найденных в ходе не-ЛТР моделирования, с эволюционными треками, может служить важным ограничением при интерпретации локального звёздного окружения.

Комбинирование представленных выше подходов к изучению наиболее массивных звезд в представленной диссертации позволило пролить свет на природу некоторых наблюдаемых особенностей ярких голубых переменных и подобных им объектов.

Целью данной работы являлось исследование звезд предельной светимости на промежуточных стадиях эволюции при помощи статистического анализа их звездного окружения и не-ЛТР моделирования ветров. Для достижения поставленной цели, решались следующие **задачи**:

1. Отбор ярких голубых звезд с $M_{\text{init}} \gtrsim 20 M_{\odot}$, которые на текущий момент находятся на Главной последовательности и, потенциально, могут являться эволюционными предшественниками LBVs. Построение оптимального алгоритма поиска компактных групп проекционно близких ярких голубых звезд.
2. Исследование пространственного положения массивных звезд различных подтипов (голубые звезды Главной последовательности, красные сверхгиганты, LBVs/cLBVs, звезды Вольфа-Райе) относительно найденных ОБ-ассоциаций. Выполнение сравнительного анализа полученных функций распределения проекционных расстояний до ближайшей группы ярких голубых звезд.
3. Определение фундаментальных параметров LBVs с использованием не-ЛТР моделей протяженных атмосфер при аналитическом задании распределения скорости в ветре.
4. Расчет сеток моделей протяженных атмосфер, позволяющих делать быстрые оценки параметров ветра для LBV-звезд и некоторых других объектов с плотными ветрами.
5. Разработка и реализация алгоритма расчета самосогласованных гидродинамических не-ЛТР моделей протяженных атмосфер, учитывающих баланс радиальных сил в ветре. Применение разработанных гидродинамических моделей ветра для получения оценок массы LBVs. Сравнение найденных значений с параметрами, предсказываемыми эволюционными моделями. Анализ динамических свойства ветра LBVs.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Показано, что распределение расстояний до ближайшей группы ярких голубых звезд, полученное для полной выборки LBVs/cLBVs в галактике М33 близко к распределениям массивных звезд с начальной массой $M_{\text{init}} \gtrsim 20 M_{\odot}$ и звезд Вольфа-Райе, что соответствует стандартному предположению о природе ярких голубых переменных как промежуточной стадии эволюции одиночных массивных звезд.
2. По результатам не-ЛТР моделирования оптического и инфракрасного спектров Галактического LBV-кандидата MN112 определены основные параметры звезды и ее ветра. Показано, что MN112 обладает более протяженной фотосферой, чем прототип класса "спящих" ярких голубых переменных P Cygni, к которому, по-видимому, относится MN112.
3. Построена сетка не-ЛТР моделей протяженных атмосфер в диапазоне температур $12000 \text{ K} \lesssim T_* \lesssim 40000 \text{ K}$, представленная в виде диаграмм эквивалентных ширин эмиссионных линий. С их помощью были определены температура и темп потери массы ряда LBVs и LBV-кандидатов. Показано, что полученные оценки согласуются с параметрами, найденными в результате детального моделирования.
4. Рассчитана самосогласованная гидродинамическая не-ЛТР модель протяженной атмосферы яркой голубой переменной Var 2 в галактике М33, на основе которой получена надежная оценка текущей массы звезды $M_* \approx 23 M_{\odot}$. Установлено, что параметры модели Var 2 соответствуют звезде с начальной массой $M_{\text{init}} \approx 50 M_{\odot}$, движущейся на диаграмме Герцшпрунга-Рассела от более низких температур в направлении WR-звезд.

Научная новизна

1. Впервые было проведено статистическое исследование проекционного распределения LBVs/cLBVs относительно компактных групп ярких голубых звезд.
2. Впервые было выполнено не-ЛТР моделирование оптического и инфракрасного спектров Галактического LBV-кандидата MN112.

3. Впервые представлена сетка не-ЛТР моделей протяженных атмосфер, предназначенная для определения параметров ярких голубых переменных и других объектов с плотными ветрами.
4. Впервые был воспроизведен наблюдаемый спектр LBV в рамках самосогласованной не-ЛТР модели, учитывающей баланс радиальных сил в ветре.

Научная и практическая значимость

1. Выполненное статистическое исследование положения ярчайших звезд в галактике М33 улучшило понимание об происхождении подобных объектов и их эволюции. Методика исследования проекционного распределения массивных звезд может быть расширена на другие объекты и галактики.
2. Полученный скоростной профиль ветра галактического LBV-кандидата MN112 может служить основой для моделирования подобных звёзд и уточнения самосогласованных моделей звёздного ветра, предсказывающих его динамику.
3. Рассчитанные сетки не-ЛТР моделей протяженных атмосфер предоставляют быстрый способ определения параметров объектов, показывающих признаки мощного истечения вещества.
4. Разработанный метод расчета гидродинамических не-ЛТР моделей ветров применим для исследования звезд различных типов. Продвинутые модели протяженных атмосфер позволяют получать надежные оценки параметров звезды и ее ветра, что критически важно для совершенствования эволюционных расчётов.

Апробация работы

Результаты диссертации представлялись в виде докладов на следующих всероссийских конференциях:

1. Международная астрономическая конференция "Физика звезд: от коллапса до коллапса", 2016 год, САО РАН, Нижний Архыз, "Связь ярких голубых переменных с молодыми звездными скоплениями в галактике М33", А. Костенков и др.

2. Всероссийская конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра – 2018", 2018 год, ИКИ РАН, г. Москва, "Моделирование оптических спектров двух LBV звезд: MN112 и R Cygni", А. Костенков, С. Фабрика, О. Шолухова
3. Всероссийская конференция "Современная звездная астрономия – 2019", 2019 год, САО РАН, Нижний Архыз "Моделирование оптических спектров звёзд типа R Cygni", А. Костенков, О. Шолухова, С. Фабрика
4. Всероссийская конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра – 2019", 2019 год, ИКИ РАН, г. Москва, "Определение параметров ветров LBV и ULX с использованием сеток моделей протяженных атмосфер", А. Костенков, А. Винокуров, Ю. Соловьева
5. Всероссийская конференция "Современная звездная астрономия – 2019", 2019 год, САО РАН, Нижний Архыз "Моделирование протяженных атмосфер для объектов с температурой менее 40000 К", А. Костенков, А. Винокуров, Ю. Соловьева, С. Фабрика
6. Всероссийская конференция "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра - 2023", 2023 год, ИКИ РАН, Москва, "Исследование эмиссионных спектров ряда ультраярких рентгеновских источников в рамках модели звездного ветра", А. Костенков, А. Винокуров
7. Всероссийская конференция с международным участием "Физика звёзд: теория и наблюдения", 2023 год, ГАИШ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, , "Определение параметров протяженных атмосфер с использованием сеток моделей", А. Костенков, А. Винокуров, Ю. Соловьева.
8. Всероссийская конференция с международным участием «Физика звёзд в эпоху многоволновых наблюдений», 2025 год, СПбГУ, Санкт-Петербург, "Ветер и ближайшие звездное окружение спящей яркой голубой переменной Var 2 в галактике M33", А. Костенков

Публикации по теме диссертации

Основные результаты исследований представлены в 4 рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **A. Kostenkov**, A. Vinokurov, Y. Solovyeva, K. Atapin, and S. Fabrika. Modeling of Extended Atmospheres with Temperatures below 40000 K. *Astrophysical Bulletin*, 75(2):182–190, April 2020.
2. **A. Kostenkov**, S. Fabrika, O. Sholukhova, A. Sarkisyan, and D. Bizyaev. Modelling spectra of MN112. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 496(4):5455–5462, August 2020.
3. **A. Kostenkov**, S. Fabrika, A. Kaldybekova, S. Fedorchenko, Y. Solovyeva, E. Dedov, A. Sarkisyan, A. Vinokurov, and O. Sholukhova. On the Spatial Distribution of Luminous Blue Variables in the Galaxy M33. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 25(4):045001, April 2025.
4. **A. Kostenkov**, Y. Solovyeva, E. Dedov, A. Vinokurov, and A. Sarkisyan. Probing the wind and evolutionary state of the quiescent luminous blue variable Var 2 in the Galaxy M33: constraints from self-consistent non-LTE modeling. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 26(8):085003, August, 2026.

Личный вклад автора

Автору диссертации принадлежит определяющий вклад в представленную работу, включающий концепцию исследований, разработку и программную реализацию ключевых методов, расчет моделей ветра при помощи кода CMFGEN, а также подготовку публикаций. В частности, автором были подготовлены и реализованы методика отбора ярких голубых звезд, алгоритм моделирования звездных полей, построение функций распределения различных массивных звезд по расстояниям до ближайшей ОБ-ассоциации, графическое программное обеспечение для работы с моделями CMFGEN, скрипты для аппроксимации фотометрических данных и построения сеток моделей, а также итеративный алгоритм расчета самосогласованных радиационно-гидродинамических не-ЛТР моделей ветра.

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 146 страниц, включая 33 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 308 наименований.

Во **введении** сжато изложены основные сведения об эволюции массивных звезд. Особое внимание уделено краткосрочной промежуточной стадии эволюции, во время которой звезда наблюдается как яркая голубая переменная, рассмотрены основные гипотезы, объясняющие их природу. Кратко описаны два альтернативных подхода в исследовании массивных звезд. Определены цели и задачи исследования, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы. Выделен личный вклад автора в полученные результаты.

В **первой главе** представлено исследование пространственного распределения LBVs и различных LBV-кандидатов относительно центров ближайших ОБ-ассоциаций в галактике М33. Подробно описана методика поиска компактных групп ярких голубых звезд. Выполнен сравнительный анализ распределений расстояний до ближайшей ОБ-ассоциации, полученных для полной выборки LBVs/cLBVs, массивных голубых звезд и красных сверхгигантов и звезд Вольфа-Райе.

Во **второй главе** содержатся результаты не-ЛТР моделирования Галактического LBV-кандидата MN112. Получены оценки основных параметров ветра и химического состава LBV-кандидата MN112 в ходе моделирования оптического и инфракрасного спектров. Полученные значения параметров были сопоставлены с результатами моделирования Р Cygni, а так же некоторыми параметрами ветра других подобных звезд. Так же была заложена база для определения фундаментальных параметров различных LBV-звезд.

В **третьей главе** представлены сетки моделей протяженных атмосфер в диапазоне температур $12000\text{ K} \lesssim T_* \lesssim 40000\text{ K}$, реализованные в виде диаграмм эквивалентных ширин эмиссионных линий, наблюдаемых в спектрах LBV-подобных звезд. Обсуждаются возможные наборы критериев, позволяющие оценить температуру и темп потери массы в различных объектах, имеющих признаки мощного истечения вещества. Показано, что параметры ветров, измеренные с помощью сеток и полученные на основе детального моделирования, демонстрируют довольно хорошее согласие между собой.

Четвертая глава посвящена исследованию яркой голубой переменной Var 2 в галактике М33, которая на данный момент находится в "спящем" состоянии и наблюдается как звезда типа Ofpe/WN9. Фундаментальные параметры данной LBV были определены при помощи самосогласованных гидродинамических не-ЛТР моделей протяженной атмосферы, учитывающих баланс радиаль-

ных сил в ветре звезды. Подробно описан алгоритм расчета подобных моделей. На основе сравнения фундаментальных параметров, полученных в ходе моделирования, и их значений, предсказываемых эволюционными моделями, получены оценки начальной массы и возраста Var 2. Приведено сравнение оценок возрастов Var 2 и ее звездного окружения. Выполнен статистический анализ проекционного распределения звезд в окрестности Var 2.

В **заключении** кратко приведены основные результаты проведенных исследований.

Глава 1. Исследование пространственного распределения ярких голубых переменных в галактике М33

Первая глава диссертации посвящена исследованию предположения о формировании LBVs в тесных массивных двойных системах. Начнем с исторической хронологии исследования данной гипотезы.

1.1 LBVs как продукт эволюции двойной системы

Подход, связывающий происхождение LBVs с эволюцией тесных двойных систем, является сравнительно новым направлением в исследовании LBVs и других звезд предельных светимостей. Одним из подтверждений этой идеи стало обнаруженная Смитом и Томблсоном изолированность 18 LBVs и 11 LBV-кандидатов относительно массивных О-звезд в Млечном Пути и Магеллановых Облаках [53], причём степень изолированности оказалась гораздо больше, чем допускают модели эволюции одиночной массивной звезды. Авторы предположили, что изоляция LBVs, найденная в ходе исследования распределения расстояний до первой и второй ближайшей О-звезды, может быть объяснена в рамках эволюции тесных двойных звезд, и что LBVs представляют собой "омоложенные" в результате обмена масс звезды. Однако, в исследовании Хэмфрис и др. [54] было отмечено, что использованная в работе [53] выборка неоднородна и включает в себя звезды с различным эволюционным статусом: классические LBVs ($M_{\text{init}} \gtrsim 50 M_{\odot}$), LBVs малой светимости ($M_{\text{init}} \approx 25 - 40 M_{\odot}$), LBV-кандидаты и эруптивные LBVs типа η Car. В работе [55] было повторно проведено сравнение распределений расстояний от LBVs до О-звезд с учётом разделения разных типов LBVs, и в результате обнаруженная ранее изоляция ярких голубых переменных была подтверждена. Авторы показали, что наиболее яркие подтвержденные LBVs имеют окружение, подобное звездам позднего О-типа, средний возраст которых примерно в два раза больше, чем предполагаемый возраст данных LBVs в сценарии эволюции одиночной массивной звезды. Кроме того, в работе также обнаружено, что подтвержденные LBVs малой светимости имеют распределение, близкое к распределению, показываемому красными сверхгигантами, большинство из которых имеют начальные

массы $M_{\text{init}} \sim 10 - 15 M_{\odot}$, что составляет около половины от массы LBVs малой светимости.

В работе Аадлэнда и др. [58] были пересмотрены фотометрические критерии отбора наиболее массивных непроэволюционировавших звезд в галактиках Большое Магелланово Облако (БМО), M31 и M33. Авторы пришли к выводу, что пространственное распределение LBVs/cLBVs (всего 78 объектов в трех галактиках) близко к распределению ярких голубых звезд (bright blue stars, BBS), в то время как более старые красные сверхгиганты (red supergiants, RSGs) и звезды Вольфа-Райе показывают большую пространственную изоляцию. Однако, в исследовании [59] было указано на несогласованность выборки BBS в работе [58], включающей в себя большое количество В-сверхгигантов с массами $\sim 20 M_{\odot}$. Также в работе [99] было указано, что выборка [58] содержит B[e]-сверхгиганты (sgB[e]), отнесенные к LBV-кандидатам, что ведет к искажению результата. В соответствии с результатами нового исследования, представленного в работе [59], Смит пришел к выводу, что звездное население, отобранное в работе [58] в большей степени соответствует ранним В-сверхгигантам с возрастами порядка 10 миллионов лет, а не наиболее молодым и массивным О-звездам с возрастами около 3-4 миллионов лет. Автор отметил сходство пространственной изоляции ярких голубых переменных с удаленностью ранних В-сверхгигантов — менее массивных и более старых относительно LBV. Смит в работе [59] объясняет данный феномен в рамках сценариев эволюции ярких голубых переменных в двойной системе [57].

Расчет моделей пространственного распределения молодых звездных скоплений показал, что стандартная модель эволюции одиночной звезды в большинстве случаев не согласуется со звездным окружением ярких голубых переменных [57]. Для объяснения феномена пространственной изоляции LBVs в работе [57] были рассмотрены две возможные модели эволюции LBVs в тесных двойных системах. В рамках первой модели LBV представляют собой результат слияния двух массивных звезд [51], а их изолированность объясняется увеличенным максимальным временем жизни звезды и, как следствие, большим временем для удаления от других массивных звезд. В альтернативной модели рассматривается аккреция вещества на менее массивную звезду в двойной системе и последующий взрыв более массивной звезды как сверхновой с выбросом насыщенного веществом компаньона из системы (binary supernova

scenario, BSS) [100]. Моделирование распада двойных систем показывает, что скорость выброшенной звезды сопоставима с орбитальной и редко превышает 30 км с^{-1} [93, 101].

В то же время, массивные звезды, в том числе яркие голубые переменные, также могут получить ускорение и покинуть скопление в результате многочисленных гравитационных взаимодействий в областях с высокой плотностью звезд, например, центрах скоплений (dynamical ejection scenario, DES) [100, 102]. Действительно, "убегающие" ОВ-звезды могут иметь пекулярные скорости вплоть до 200 км с^{-1} [103, 104], а их средняя дисперсия скоростей $\sigma_v \sim 30 \text{ км с}^{-1}$ значительно превышает значения $\sigma_v \sim 10 \text{ км с}^{-1}$, полученные для "нормальных" звезд ранних типов [105]. Согласно результатам численного моделирования задачи N-тел в массивном скоплении, количество выброшенных двойных звездных систем значительно падает с ростом скорости выброса из скопления, которая не превышает $\sim 150 \text{ км с}^{-1}$ [106, 107], в отличие от одиночных звезд, верхняя граница оценок скоростей для которых составляет $\sim 300 \text{ км с}^{-1}$ [107] или $\sim 400\text{--}450 \text{ км с}^{-1}$ [106]. В работе [106] также было показано, что всего в компактных звездных группах может быть выброшено до 60% массивных звезд в течение первых 3 миллионов лет до появления первых сверхновых (~ 4 миллионов лет).

В "убегающей" двойной звездной системе асимметричный взрыв сверхновой может дополнительно ускорить компаньон до скоростей, превышающих первоначальную скорость выброса до 1.5-2 раз (двухэтапный выброс, two-step ejection) [108]. Выбросы ОВ-звезд в результате динамических взаимодействий внутри скопления происходит в $\sim 2\text{--}3$ раза чаще, чем при взрыве компаньона как сверхновой [109]. Согласно оценкам, представленным в работе [109], около половины звезд, включенных в BSS-выборку, получили дополнительное ускорение в результате двухэтапного выброса.

Анализ кинематики ярких голубых переменных в БМО, показал, что треть LBVs имеют радиальные скорости более 25 км с^{-1} , в то время как среди красных сверхгигантов лишь 9% звезд имеют такие скорости [61]. Авторы пришли к выводу, что яркие голубые переменные более вероятно были выброшены в результате взрыва сверхновой, чем остальные проэволюционировавшие массивные звезды. В работе приведены дисперсии скоростей ярких голубых переменных $\sigma_{\text{LBV}} = 40^{+9.9}_{-6.6} \text{ км с}^{-1}$, которые оказались существенно выше, чем у красных

сверхгигантов $\sigma_{\text{RSG}} = 16.5^{+0.4}_{-0.6} \text{ км с}^{-1}$. В исследовании [61] также отмечено, что четыре LBVs (S119, R71, S Dor и Sk-69°271) из представленной выборки обладают существенно большими скоростями относительно других ярких голубых переменных, без которых средняя дисперсия скоростей $\sigma_{\text{LBV}} = 16.2^{+3.2}_{-4.4} \text{ км с}$ выборки близка к полученной для RSGs. В работе высказано предположение, что оставшиеся яркие голубые переменные с низкими скоростями, вероятно, все равно могли быть выброшены с низкой скоростью в результате взрыва сверхновой или были "омоложены" в результате аккреции с компаньона или слияния в двойной системе.

Однако, исследование Галактических гипергигантов ранних спектральных классов, часть из которых имеют признаки LBV-звезд, напротив, не показало свидетельств их изолированности относительно звездного и газового окружения [60], и лишь одна звезда HD 183143 из представленных в исследовании не относится в какой-либо группе OB-звезд или молекулярных облаков, при этом она не обладает высокой скоростью относительно её окружения.

В то же время, в работе [110], базирующейся на результатах долговременной спектроскопии и интерферометрии, показано, что доля двойных среди галактических LBV и LBV-кандидатов может составлять до 70 %. Представленные в исследовании [110] радиусы LBV-звезд $100 - 650 R_{\odot}$ делают маловероятным наличие короткопериодических систем среди LBV-подобных звезд. Авторы пришли к выводу, что если LBVs формируются в результате эволюции одиночной звезды, то первоначально они должны входить в состав очень широких пар. Если же LBVs являются результатом эволюции двойных, то либо данные массивные звезды в короткопериодических двойных системах должны пройти фазу полностью неконсервативного переноса массы, чтобы достаточно расширить орбиту для образования LBV, либо LBVs образуются путем слияния в изначально двойных или тройных системах. Однако, наблюдаемые выброшенные звезды, получившие ускорение в результате взрыва сверхновой, вероятнее всего эволюционировали в наиболее тесных парах с наибольшими орбитальными скоростями, что подтверждается наблюдениями "убегающих" звезд O-типа [111], большинство из которых имеют высокие скорости вращения [112]. Исследования пространственной изоляции OBe звезд [113] и их кинематики [114, 115] показывают, что они, вероятно, также являются продуктом эволюции BSS-типа. Это согласуется с представлением об эволюции Be-звезд в тесной паре эмиссион-

ных звезд, в рамках которой компаньон раскручивается вплоть до критических скоростей вследствие переноса массы с более массивной звезды [116] с последующим образованием газопылевого диска, свойственного Be-звездам [99, 117]. Однако, LBVs не показывают признаки вращения со скоростями близкими к критическим, одним из отличительных признаков ярких голубых переменных является отсутствие газопылевого диска [118]. В работе [74] были выделены две группы ярких голубых переменных: быстровращающиеся LBVs, показывающие сильную переменность, например, AG Car или HR Car, и медленно вращающиеся, слабо переменные яркие голубые переменные, такие, как P Cygni или HD 168625. Авторы также отмечают, что быстровращающиеся LBVs должны эволюционировать в звезды Вольфа-Райе без потери существенной части углового момента, образуя группу быстро вращающихся WR-звезд, существование которой не подтверждается наблюдениями и не предсказывается эволюционными моделями [12, 119], или же взрываться как сверхновые II типа на стадии LBV. Измерения скоростей вращения WR-звезд затруднены ввиду наличия плотного, оптически непрозрачного ветра [120–122]. В то же время, анализ влияния вращения на некоторые особенности профилей эмиссионных линий в модельных спектрах показал, что звезды Вольфа-Райе могут иметь высокие скорости вращения $v_{\text{core}} \sin i \sim 200$ км/с на поверхности звезды [123].

Таким образом, вопрос о том, является ли LBV стадией эволюции одиночной массивной звезды или двойной системы всё еще обсуждается. Как было показано в работах Хэмфрис и др. [54] и Аадлэнда и др. [58], выводы об изоляции LBVs, сделанные в исследованиях Смита [53, 55, 59], являются сильно зависящими от выборки OB-звезд. Надежность полученных результатов также ухудшается вследствие небольшого количества известных LBVs и LBV-кандидатов.

Как было продемонстрировано в исследовании проекционного распределения звездного населения галактики M33 [124], OB-звезды показывают иерархическую структуру областей звездообразования: некоторые, вероятно, наиболее молодые звезды, образуют плотные группы на наименьших пространственных масштабах, которые в свою очередь могут быть включены в протяженные области с меньшей суммарной концентрацией различных голубых звезд. Действительно, различные алгоритмы кластеризации, основанные на выделении наиболее плотных звездных групп, успешно применялись многими авторами для поиска OB-ассоциаций [125–129].

Подобные работы приводят к идее, что исследование распределения проекционных расстояний до центра ближайшей группы голубых звезд позволит сделать более однозначные выводы об эволюционном статусе LBVs, нежели распределение расстояний до первой или второй ближайшей массивной звезды ввиду меньшего влияния статистической погрешности и эффектов, связанных с неоднородностью выборки. В случае одиночного сценария эволюции LBVs как промежуточной стадии эволюции наиболее массивных звезд, ожидается, что они будут пространственно близки к проекционным центрам молодых скоплений, состоящим преимущественно из массивных голубых звезд, а относительное распределение должно быть похоже на показываемое ранними O- или WR-звездами.

В данной главе диссертации представлено исследование пространственного распределения LBVs и потенциально эволюционно-связанных с ними звезд на примере галактики М33. Выбор галактики был обусловлен относительно большим количеством известных LBVs и LBV-кандидатов, пространственным расположением галактики М33, а также наличием качественных фотометрических данных.

На первом этапе работы были проанализировали фотометрические критерии, использованные для получения выборок массивных звезд, представленные в работах других авторов. Далее, были выделены две группы звезд в соответствии с выбранными показателями цвета и светимостями. В первую выборку вошли наиболее яркие горячие звезды, которые, предположительно, являются эволюционными предшественниками LBV в рамках сценария одиночной эволюции. Вторая группа состоит из голубых звезд с меньшими светимостями и, соответственно, меньшими начальными массами, подобное разделение позволило провести сравнительный анализ пространственного распределения звезд различных возрастов.

Во второй части работы были исследованы различные методы кластеризации, которые могут быть использованы при поиске ОВ-ассоциаций. Оптимальные параметры выбранных алгоритмов были определены при помощи моделирования расположения звезд в картинной плоскости, расчет которого выполнялся на основе информации о звездном окружении известных LBVs/cLBVs в галактике М33. На заключительном этапе были построены распределения расстояний от массивных звезд до ближайших центров найденных скоплений,

а так же был проведен сравнительный анализ относительного проекционного расположения звезд различных типов и центров ОВ-ассоциаций.

Выбор и анализ фотометрических данных

Аналогично исследованию окружения LBVs Аадлэнда и др. [58], в данной работе была использована UBVRi фотометрия звезд галактики М33, представленная в обзоре Local Group Galaxies Survey (LGGS) [130, 131]. Для получения выборки наиболее массивных звезд в работе [58] применялся ограничивающий максимальную абсолютную величину критерий $M_V < -5.0$ с учетом покраснения $E(B - V) = 0.13$, типичного для ОВ-звезд в галактике М33 [17, 132]. Дополнительно, авторами использовался независимый от поглощения параметр $Q = (U - B) - q_r \times (B - V)$ для отбора наиболее горячих звезд при стандартном значении наклона кривой покраснения $q_r = E(U - B)/E(B - V) \approx 0.72$ [132]. Выборка была ограничена $Q < -0.88$, что соответствует эффективным температурам $T_{\text{eff}} > 35000$ К для звезд I класса светимости [133], а для исключения звезд с нереалистичными цветами и большими ошибками фотометрии применялись дополнительные критерии: $Q < -1.20$, $(U - B) < -0.5$ и $(B - V) < 0.2$. Примерные границы области диаграммы температура-светимость, подходящей под данные фотометрические критерии, вместе с эволюционными треками проиллюстрированы на Рис. 1. Данный рисунок идентичен Рис. 1 из работы [58], однако, в текущей работе использовались эволюционные треки с пониженным относительно солнечного значением металличности $Z=0.006$ [7], в соответствии с содержанием кислорода в HII областях галактики М33 [134].

В работе [59] было отмечено, что ошибка фотометрических измерений, используемых в исследовании [58] больше, чем, например, разница в цвете между О- и ранними В-звездами, которая составляет $\Delta(B - V) \approx 0.02 - 0.03$ или $\Delta Q \approx 0.05$. Также в работе [59] было указано на то, что неопределенность в измерениях нуль-пункта достигает 0.02 mag в фильтрах B или V и 0.03–0.04 mag в фильтре U , а среднеквадратичные отклонения фотометрических измерений между снимками одинаковых звезд могут составлять $\sigma_U = 0.13$, $\sigma_B = 0.07$ и $\sigma_V = 0.06$ [136]. Дополнительно, автор отметил, что ошибки фотометрии звезд с $V < 13.9$ могут достигать значений вплоть до 0.1 mag в зависимости от фильтра [137].

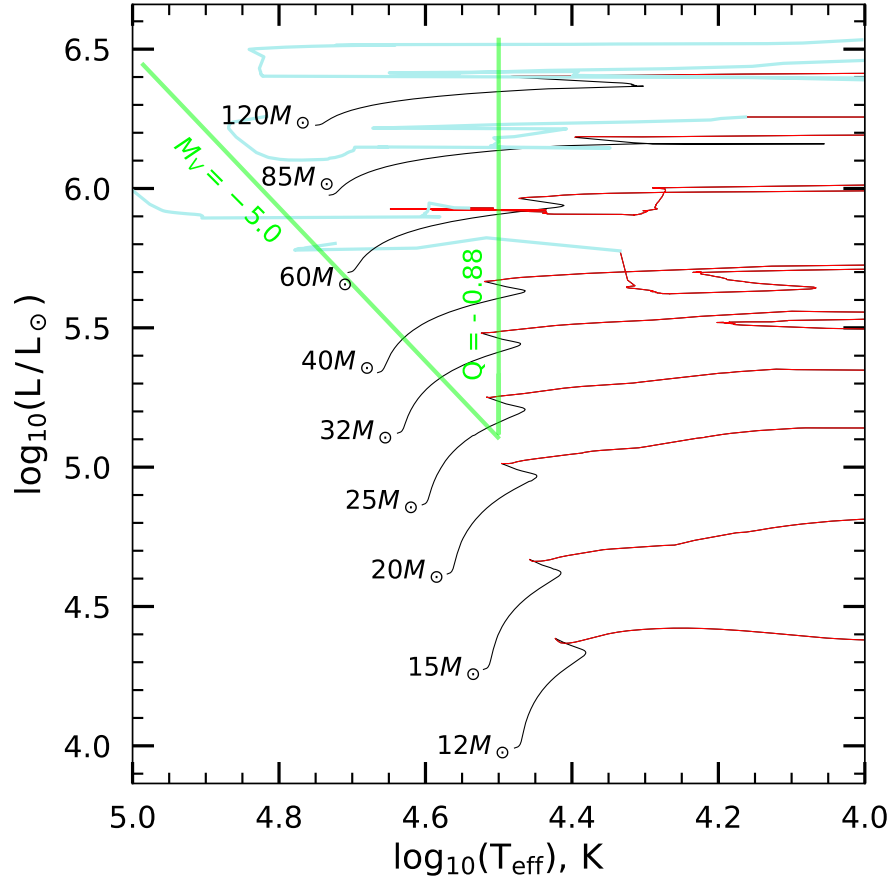


Рисунок 1 — Диаграмма "температура-светимость" с нанесенными эволюционными треками для $Z=0.006$ [7]. Черным цветом обозначена стадия главной последовательности, остальными цветами — более поздние этапы звездной эволюции: стадию после завершения горения водорода в ядре (красные линии) и фазу, когда содержание водорода на поверхности составляет менее 20% (бирюзовые линии). Зелеными линиями выделены границы области диаграммы с наиболее массивным непроэволюционировавшим звездам. Преобразование цвета в эффективную температуру $Q - T_{\text{eff}}$ и болометрические поправки рассчитаны согласно соотношениям, представленным в работах [133] и [135], соответственно.

Действительно, как показывают модели атмосфер, зависимость цвета ($B - V$) от эффективной температуры существенно ослабевает для В-сверхгигантов спектрального класса В5-В6 ($T_{\text{eff}} > 15000$ K) и более горячих звезд [138, 139]. Показатель цвета ($U - B$) является чувствительным температурным индикатором для ОВ-звезд [138, 140], однако, неопределенность в значениях покраснения не позволяет использовать его для точной диагностики спектральных классов [141]. В то же время, суммарное влияние множества ошибок UBV фотометрии, упомянутых выше, может давать непредсказуемое искажение вели-

чины независимого от поглощения индекса Q .

Все вышеперечисленные факторы существенно влияют на принципиальную возможность отбора наиболее горячих звезд. Для оценки влияния фотометрических ошибок на результаты исследования, было выполнено сравнение пространственного распределения массивных голубых звезд полученных выборок с распределениями, показываемыми проэволюционировавшими звездами соответствующих начальных масс, идентифицированными независимыми методами.

На первом этапе исследования были отфильтрованы звезды каталога LGGS согласно фотометрическим критериям $Q < -1.20$, $(U - B) < -0.5$ и $(B - V) < 0.2$ для уменьшения влияния ошибок фотометрии на результаты исследования, аналогично тому как это было сделано Аадлэндом и др. [58]. В последующей работе для получения оптимальной выборки голубых звезд использовались простые фотометрические критерии $(U - B)$ и $(B - V)$ в соответствии со спектральной классификацией с учетом покраснения $E(B - V) = 0.13$ [133] и стандартного значения $R_V = 3.1$. Предположительно, влияние поглощения будет иметь ограниченный эффект на полученную выборку звезд, в исследовании [133] была найдена низкая дисперсия значений $E(B - V) = 0.13 \pm 0.02$ среди ОВ-ассоциаций в галактике М33. В других работах были получены идентичные средние значения покраснения [17, 142].

В рамках представленной работы были использованы две звездные выборки, отличающиеся по потенциальным начальным массам и, соответственно, возрастам звезд. В первую группу вошли голубые звезды с показателями цвета $(U - B) < -1.00$, $(B - V) < -0.20$ и $M_V < -5.0$. Данные критерии соответствуют ранним В-сверхгигантам и более горячим звездам I класса светимости [126, 139, 143, 144] с начальными массами $M_{\text{init}} \gtrsim 20 M_{\odot}$ [7, 141]. Первая выборка также была дополнена звездами с $Q < -0.96$, которые могут потенциально являться наиболее горячими ранними О-звездами с температурой фотосферы $\log T_{\text{eff}} \gtrsim 4.60$, испытывающими большее поглощение, чем в среднем голубые звезды галактики М33. Дополнительно, были отобраны О-звезды с $Q < -0.88$, $M_V < -5.0$ и отсортированы по расстоянию до ближайшей области ионизированного водорода, идентифицированной на H II изображении галактики М33 [145] с помощью программного обеспечения SEXTRACTOR [146]. Идентифицированные H II области вместе с выборкой голубых звезд представлены

на рисунке 2. Перекрестная корреляция нижнего квартиля полученной выборки со звездами, отобранных по фотометрическим критериям $(U - B) < -1.00$, $(B - V) < -0.20$ и $M_V < -5.0$, позволила выявить дополнительные 85 ярких голубых звезд, которые, предположительно, являются сильно покрасненными. Использование ограничения $Q < -0.96$, соответствующего большим температурам атмосферы, чем представленные выше показатели цвета, и проекционного положения Н II областей в галактике, позволило минимизировать включение множества маломассивных звезд в выборку.

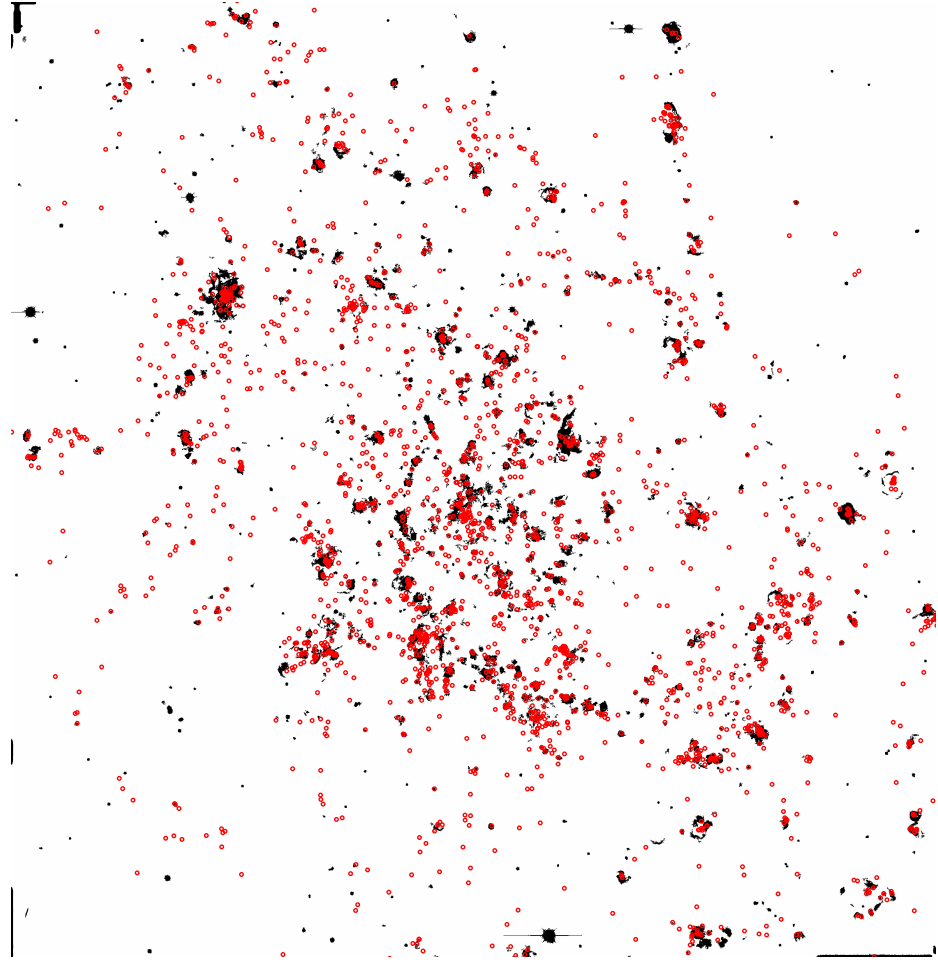


Рисунок 2 — Идентифицированные Н II области галактики М33 (черный цвет) вместе с выборкой голубых звезд, отобранной по фотометрическим критериям $Q < -0.88$, $M_V < -5.0$ (красные кружки).

Вторая группа включает в себя голубые звезды ранних спектральных типов преимущественно главной последовательности с $10 M_{\odot} \lesssim M_{\text{init}} \lesssim 20 M_{\odot}$, отобранные с учетом соотношений $(U - B) < -0.90$, $(B - V) < -0.25$ и $-3.0 < M_V < -4.0$ [138, 139, 143, 147, 148]. На финальном этапе в ходе кросс-корреляции полученных списков голубых звезд с каталогом, представленным в [149], из выборок были исключены WR-звезды, которые также подходят под

представленные выше фотометрические критерии. Таким образом, суммарно в первую и вторую группу вошли 2912 и 5376 звезд, соответственно. Идентификация ОВ-ассоциаций в последующей работе выполнялась на основе первой выборки, включающей в себя наиболее массивные голубые звезды, которые, вероятно, должны быть расположены вблизи центров родительских скоплений и поэтому лучше подходят для поиска относительно компактных молодых звездных групп.

1.2 Выборка LBVs и LBV-кандидатов

Как и в исследовании Смита и Томблсона [53], в текущей работе была использована выборка, включающую в себя как подтвержденные LBV, так и LBV-кандидаты. Критерии принадлежности ярких голубых звезд к группе кандидатов в LBV существенно разнятся среди исследований различных групп авторов [17, 63, 118, 150]. Наиболее строго сформулированные признаки LBV были приведены в работе [118]. Также в серии работ [118, 151] авторами был выполнен подробный анализ оптических спектров, ИК-фотометрии и светимостей LBV-кандидатов в галактиках M31 и M33. Согласно [118, 151], кандидатов в LBV можно разделить на несколько подгрупп в зависимости от спектральных особенностей: Of/late-WN, звезды с яркими эмиссионными линиями Fe II, некоторые голубые и желтые сверхгиганты.

В текущем исследовании был использован список из 4 LBV и 19 LBV-кандидатов [118], дополненный тремя объектами: J013242.26+302114.1, J013312.81+303012.6 и J013332.64+304127.2. Звезда J013242.26+302114.1, имеющая признаки LBV, была классифицирована как B[e]-сверхгигант в исследовании [118], однако, в работе [99] было показано, что J013242.26+302114.1 не может быть отнесена к данному типу объектов и определение ее эволюционного статуса требует дальнейших исследований. J013312.81+303012.6 является новым LBV-кандидатом, представленным в работе [152]. Звезда J013332.64+304127.2 была классифицирована как горячий LBV-кандидат, вид спектра которого претерпел существенные изменения с момента первых наблюдений [17]. В 1982 году в спектре наблюдалась широкая линия He II $\lambda 4686$ и линии азота N III, свойственные для поздних WN звезд [153], тогда как представленный в работе [17] новый спектр звезды показал множество линий Fe II и [Fe II], типичных для более холодных звезд, в том числе LBV/cLBV. Оптический спектр

J013332.64+304127.2, полученный в 2010 году и использованный при отборе LBV-кандидатов в работе [118], оказался близок к спектрам поздних WN звезд, аналогично наблюдениям 1982 года. Ввиду отсутствия P Cyg профилей наиболее ярких эмиссионных линий водорода Бальмеровской серии и He I J013332.64+304127.2 не вошла в выборку LBV-кандидатов в галактике M33, представленную в исследовании [118]. Однако, вследствие неопределенности со значительной спектральной переменностью данного объекта, в рамках текущей работы J013332.64+304127.2 была отнесена к LBV-кандидатам. Объекты, упомянутые выше, были включены в список LBV-кандидатов в галактике M33, представленный Хэмфрис и др. [118]. Таким образом, всего их количество составило 22 в дополнение к 4 подтвержденным LBV (Var B, Var C, Var 2, Var 83).

1.3 Методы идентификации звездных групп

Среди множества доступных алгоритмов поиска звездных групп [154] для решения задач кластеризации звезд по данным каталогов чаще всего используются методы, основанные на поиске наиболее плотных областей точек в пространстве, например, такие как DBSCAN [155–158], близкий аналог которого известен в астрономии с начала 90-ых годов как PLC процедура [125, 126, 128]. Классическая реализация метода DBSCAN оперирует двумя параметрами – минимальным количеством точек в заданной окрестности точки, необходимым для формирования группы $N_{\min}$ и радиусом поиска ближайших узлов ϵ , что позволяет проводить поиск скоплений лишь на одном пространственном масштабе. В редких случаях, когда узловые точки могут относиться к нескольким группам, число звезд в скоплениях, найденных при помощи DBSCAN может быть меньше $N_{\min}$. Далее в рамках данной главы предполагается, что число таких групп незначительно и, как следствие, $N_{\min}$ определяет минимальное число звезд в идентифицированных скоплениях.

Иерархическая кластеризация возможна при помощи различных модифицированных и расширенных версий алгоритма, например, таких как HDBSCAN [159] и OPTICS [160]. OPTICS, аналогично DBSCAN, использует $N_{\min}$ в качестве одного из двух входных параметров, при этом порог выделения групп дополнительно определяется при помощи графика достижимости для каждого узла, представляющего собой упорядоченный набор расстояний, рассчитанный для полного набора данных начиная с выбранной точки до ближайшей следую-

щей. Максимальное отношение двух последовательных расстояний на графике достижимости ограничено $1 - \chi$, где χ – произвольных параметр в диапазоне от 0 до 1. В то же время, алгоритм HDBSCAN использует только $N_{\min}$ для выполнения оптимальной кластеризации данных.

В представленной работе были использованы методы DBSCAN и OPTICS для задачи поиска ОБ-ассоциаций. Подобный выбор алгоритмов был обусловлен большей гибкостью в исследовании кластеризации звездных выборок при различной скученности окружающих звезд, например, в разных частях галактики с разными фоновой плотностью звезд и средним число потенциальных скоплений на единицу площади. Отметим, что получаемый результат полностью зависит от начальных параметров упомянутых выше методов, поэтому выбор их значений должен быть заранее определен и обоснован в контексте решаемой проблемы. Для получения оптимальных значений $(N_{\min}, \epsilon)$ и $(N_{\min}, \chi)$ для DBSCAN и OPTICS, соответственно, были использованы модельные распределения проекционных положений звезд с учетом свойств наблюдаемого окружения LBVs/cLBVs в галактике M33.

Метод генерации звездных полей основывался на Монте-Карло алгоритме моделирования диссипации скоплений, представленном в работе [57]. Подход, использованный для подбора оптимальных параметров поиска ОБ-ассоциаций, опирается на сложившееся представление о том, что наиболее массивные звёзды формируются преимущественно в скоплениях, и, как правило, наблюдаются в их центральных областях [161, 162]. Покидая родительские скопления на ранних стадиях динамической эволюции, они образуют гравитационно не связанные, но сохраняющие пространственную близость и общность происхождения группы, наблюдаемые как молодые ассоциации или их подгруппы [163, 164]. В реальных условиях такие группы являются элементами более крупной иерархической структуры, объединяющей несколько разновозрастных очагов звездообразования [165, 166]. Моделирование дает возможность подобрать параметры DBSCAN и OPTICS так, чтобы они с достаточным уровнем точности выделяли локальные группы наиболее массивных ОБ-звезд на нижнем уровне иерархии во всём диапазоне наблюдаемых состояний – от скоплений до частично рассеявшихся подгрупп, и тем самым проследить примерное положение локальных центров звездообразования, общих для звёзд каждой конкретной области. Далее будут рассмотрены основные положения, принятые при расчете данных

моделей.

На начальном этапе работы были выделены окружности с проекционным радиусом 500 пк вокруг 4 LBVs и 22 LBV-кандидатов в соответствии с расстоянием до галактики М33, равным $d = 9.2 \times 10^5$ пк [167]. По координатам из выборки наиболее ярких звезд, представленной в разделе 2.1, для выбранных областей была измерена звездная концентрация и визуально оценено вероятное количество ОВ-ассоциаций. Полученные значения были использованы для моделирования случайных звездных полей идентичной формы и размеров в предположении Пуассоновского распределения количества рассматриваемых объектов. Таким образом, в рассчитанных моделях были учтены особенности звездного окружения LBVs/cLBVs, обнаруженных в разных частях галактики: в центре, рукавах и на периферии. После вычисления звездного фона, количества и положений центров скоплений, использовалась простая модель разлета массивных звезд относительно центра родительских скоплений для расчета проекционного расположения групп ОВ-звезд.

В рамках упрощенной модели предполагалось, что все голубые звезды удаляются относительно центра родительского скопления с фиксированной скоростью $v_{ej} = 10 \text{ км с}^{-1}$, таким образом, моделируя диссипацию звездной группы как в результате потери газа и последующего расширения группы, так и вследствие динамических взаимодействий. Принятое значение скорости v_{ej} представляет собой усреднённую оценку, учитывающую оба процесса. Выбранная величина v_{ej} является наиболее типичной оценкой скорости для ОВ-звезд [103, 168, 169] и примерно соответствует значению дисперсии скоростей, использованному в работе [57] для оценки скорости разлета звезд. Данное значение также близко максимуму распределения скоростей массивных звезд, покинувших скопление, полученному при моделировании задачи N тел в работе [106].

В рассчитываемых моделях направление движения звезд в картинной плоскости было равновероятным в диапазоне от 0 до 2π . Для каждой звезды проекционное расстояние от первоначального центра группы было сэмпировано из нормального распределения с дисперсией $\sigma = v_{ej}(t_{age} - t_{ej})$, где t_{age} — случайно выбранный возраст скопления, t_{ej} — возраст скопления на момент, когда массивные голубые звезды начинают удаляться от центра. Грубая оценка величины $t_{ej} = 0.8$ млн лет была выбрана в соответствии с результатами N-body моделирования динамической эволюции массивных звезд в молодых скоплениях [106],

где на этот возраст приходится пик темпа потери массивных звезд скоплением.

Масса каждой звезды была определена при помощи начальной функции масс Солпитера $\frac{dN_*}{dM_*} \propto M_*^{-2.35}$ [170]:

$$M_* = \left(\frac{1}{R_m(M_{*\max}^{-1.35} - M_{*\min}^{-1.35}) + M_{*\min}^{-1.35}} \right)^{0.74}, \quad (1)$$

где $M_{*\max} = 120 M_\odot$, $M_{*\min} = 20 M_\odot$ – максимальное и минимальное значение начальной массы звезды, R_m – случайное число от 0 до 1. Выбранный диапазон масс соответствует выборке наиболее ярких голубых звезд, критерии отбора которых обсуждались в разделе 1.1.

К рассматриваемому моменту времени, соответствующему случайно выбранному возрасту скопления t_{age} , некоторые массивные звезды скопления проэволюционируют. Для моделирования данного процесса была использована зависимость "время жизни на главной последовательности — начальная масса", рассчитанная при помощи кода BINARY_C [171–173]. В качестве верхней границы t_{age} была принята длительность фазы горения водорода в ядре звезды с массой $M = 20 M_\odot$, составляющее около 9.7 млн лет. Минимальное значение $t_{\text{age}} = 1.3$ млн лет было выбрано таким образом, чтобы удаляющиеся от центра родительского скопления голубые звезды могли наблюдаться как отдельные объекты при угловом разрешении $\sim 1.0''$ [130, 131] на расстоянии 9.2×10^5 пк [167] в любой момент времени в пределах заданного диапазона возрастов скопления.

В работе [57], авторы выразили соотношение между общим количеством звезд в скоплении и его массой как $N_* \propto M_{\text{cl}}$ и получили распределение количества звезд в скоплениях $\frac{dN_{\text{cl}}}{dN_*} \propto N_*^{-2}$, используя функцию Шехтера $\frac{dN_{\text{cl}}}{dM_{\text{cl}}} \propto M_{\text{cl}}^{-2}$ [174], где N_{cl} — количество скоплений, N_* — количество звезд в скоплении, а M_{cl} — масса скопления. Таким образом, общее количество членов скопления может быть случайно выбрано из полученного распределения:

$$N_* = \frac{1}{R_*(N_{*\max}^{-1} - N_{*\min}^{-1}) + N_{*\min}^{-1}}, \quad (2)$$

где $N_{*\max}$, $N_{*\min}$ — максимальное и минимальное количество звезд в скоплении, R_* — случайное число от 0 до 1. Ввиду того, что оценки общего количества звезд N_{tot} , входящих в ОВ-ассоциации, зависят от критериев отбора и методов идентификации скоплений голубых звезд, приводимые в лите-

ратуре границы диапазона возможных значений N_{tot} отличаются в несколько раз [126, 132, 175, 176]. Результат автоматического поиска ОВ-ассоциаций на основе фотометрических данных для 8 галактик показал, что усредненное количество голубых звезд в найденных группах лежит в пределах $5 \lesssim N_{\text{tot}} \lesssim 13$ [126]. Тестирование показало, что алгоритм, использованный в работе [126] для поиска ОВ-ассоциаций, не применим для идентификации групп ярких голубых звезд на основе выборки из текущего исследования, но в целом данные оценки служат хорошим начальным приближением для моделирования звездных полей. Как было отмечено автором в [126], полученные выборки преимущественно состоят из звезд с массами $M \approx 20 M_{\odot}$. С использованием формулы (14) из работы [57], был получен примерный диапазон количества массивных голубых звезд $9 \lesssim N_{\text{tot}} \lesssim 24$ на начальный момент времени $t_{\text{age}} = 1.3$ млн лет, нижняя и верхняя границы которого были приняты как значения $N_{*\text{min}}$ и $N_{*\text{max}}$.

В процессе симуляции для каждого набора параметров $(N_{\text{min}}, \epsilon)$ и (N_{min}, χ) была рассчитана 1000 звездных полей с различной плотностью объектов. Минимальное возможное количество звезд скоплений N_{min} для обоих методов поиска звездных групп варьировалось в диапазоне от 3 до 15. При идентификации скоплений алгоритмом DBSCAN радиус поиска ϵ лежал в пределах от 1 до 100 пк. Максимальное предельное значение ϵ в принятом диапазоне было вычислено при помощи соотношения $\epsilon_{\text{max}} \approx 1.33D/\sqrt{N_{\text{min}}}$ [126] при минимальном числе звезд в скоплении $N_{\text{min}} = 3$ и с использованием верхней границы оценок типичных размеров звездных ассоциаций $D \approx 30 - 130$ пк [177–179], поиск которых был выполнен вручную "на глаз", без использования методов автоматического поиска. При кластеризации объектов с помощью OPTICS был использован полный диапазон возможных значений $\chi \in [0, 1)$. Дополнительно, максимальное расстояние между двумя ближайшими точками одного скопления было ограничено $\epsilon_{\text{max}} = 100$ пк, аналогично верхней границе диапазона значений ϵ для метода DBSCAN.

Для оценки эффективности работы DBSCAN и OPTICS на модельных данных были использованы два критерия. После запуска алгоритма с выбранным набором параметров было измерено расстояние d_{min} от центра каждой найденной группы до ближайшего к нему изначального положения скопления, сгенерированного при построении звездного поля. В качестве первого критерия оценки выполненного поиска звездных групп, было принято среднее значение $\langle d_{\text{min}} \rangle$

среди расстояний $d_{\min}$, полученных по результатам обработки всех модельных данных. Ожидается, что чем меньше значение $\langle d_{\min} \rangle$, тем лучше была выполнена кластеризация для данного набора параметров. Также, для анализа качества выборки дополнительно использовался индикатор ζ , характеризующий процент найденных скоплений. Величина ζ рассчитывалась как $\zeta = N_{\text{cl}}/N_{\text{init}}$, где N_{cl} и N_{init} – общее количество найденных и сгенерированных звездных групп, соответственно. Модельное скопление считалось идентифицированным в случае, если его центр расположен на наименьшем расстоянии среди всех сгенерированных скоплений до центра любой из найденных звездных групп, не превышающем характерный масштаб ОБ-ассоциаций ~ 80 пк [177–179]. Визуальная инспекция модельных данных показала, что допустимые результаты поиска скоплений соответствуют $\zeta \gtrsim 0.7$. На рисунке 3 продемонстрирована зависимость значений $\langle d_{\min} \rangle$ и ζ , полученных в ходе моделирования звездных полей, от начальных параметров алгоритмов.

Согласно диаграммам, приведенным на рисунке 3, при поиске скоплений при помощи DBSCAN поведение величин $\langle d_{\min} \rangle$ и ζ вблизи выбранного граничного значения $\zeta = 0.7$ имеет скорее разнонаправленный характер, поэтому выбор оптимальных начальных параметров для данного алгоритма кластеризации был основан на получении минимального среднего расстояния $\langle d_{\min} \rangle$ при сохранении параметра ζ равным 0.7. Как видно на рисунке 3, для алгоритма DBSCAN значение радиуса поиска ϵ проекционно близких голубых звезд, показывающее наименьшее значение $\langle d_{\min} \rangle$ при $\zeta \gtrsim 0.7$, лежит в пределах 33–50 пк в зависимости от выбранного значения $N_{\min} = 3$ или $N_{\min} = 4$. Данные оценки ϵ несколько ниже, чем величины приводимые в работах других авторов, показывающих, что при использовании алгоритмов подобных DBSCAN, оптимальное значение радиуса поиска ОБ-ассоциаций составляет около $\sim 60 - 80$ пк при $N_{\min} = 3$ [125, 126, 180]. Предположительно, подобная разница может быть связана с неполнотой наблюдательных данных, например, в сравнении с результатами [126]. При использовании аналогичных критериев отбора и при меньшем поглощении, по данным LGGS было найдено примерно на 50% больше голубых массивных звезд.

Ввиду незначительной абсолютной разницы между средним расстоянием до ближайшего скопления $\Delta \langle d_{\min} \rangle \approx 30$ пк для найденных диапазонов значений $(N_{\min}, \epsilon)$, не превышающей нижнюю границу оценок характерных масштабов

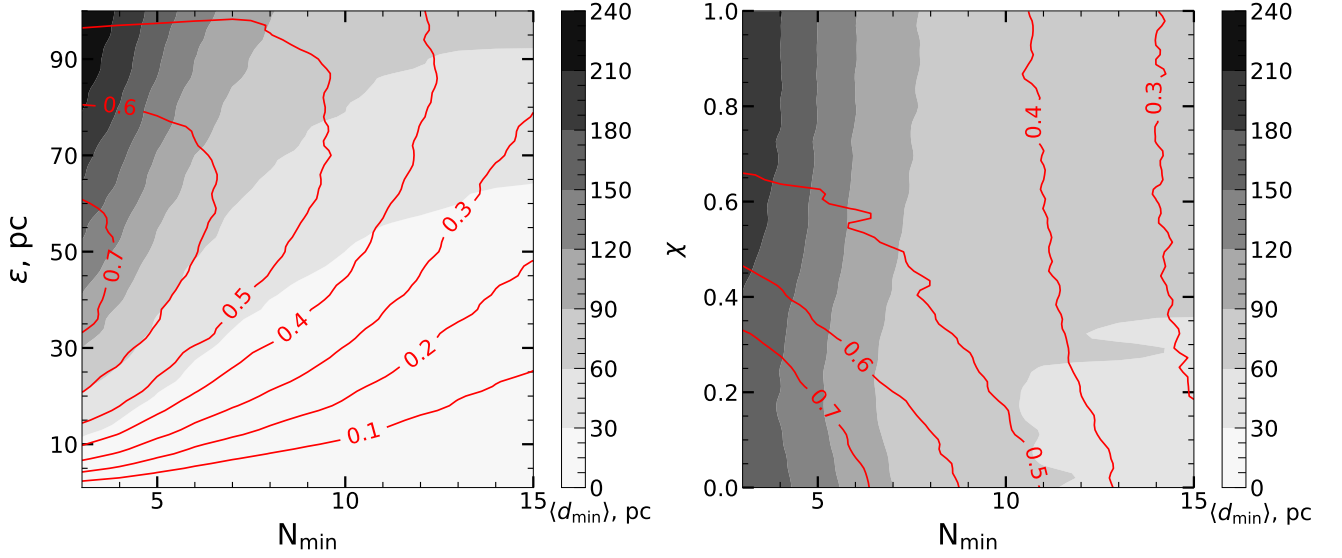


Рисунок 3 — Диаграмма распределения значений $\langle d_{\min} \rangle$ (градиентная заливка) и ζ (красные контурные линии) в зависимости от начальных параметров алгоритмов DBSCAN (слева) и OPTICS (справа).

ОВ-ассоциаций ~ 30 пк, на заключительном этапе использовался дополнительный критерий отбора начальных параметров кластеризации. Выбор финальных значений $(N_{\min}, \epsilon)$ среди пар $(3, 33)$ и $(4, 50)$, соответствующих минимуму $\langle d_{\min} \rangle$ при $\zeta = 0.7$ и выбранном $N_{\min}$, осуществлялся при помощи оценки средней нормализованной флуктуации плотности выбранных скоплений относительно звездного фона [126]:

$$F(\delta) = \left[1/N \sum_{i=1}^N (\delta_i - \langle \delta \rangle)^2 \right]^{1/2} / \sigma, \quad (3)$$

где δ_i — индивидуальная пространственная плотность звезд в каждой найденной ОВ-ассоциации, $\langle \delta \rangle$ — общая проекционная плотность выборки голубых звезд, σ — дисперсия плотности среди всех выбранных звездных групп, N — число идентифицированных ОВ-ассоциаций. Величина $F(\delta)$ характеризует дисперсию плотностей выбранных групп относительно звездного фона в единицах дисперсии плотности всей найденных скоплений. Максимальное значение $F(\delta)$ соответствует начальным параметрам кластеризации, при которых идентифицируются ОВ-ассоциации с наибольшей пространственной плотностью звезд относительно фона. Однако, отметим, что выбор начальных параметров кластеризации среди всего возможного диапазона значений лишь на основе средней нормализованной флуктуации плотности $F(\delta)$ дает неудовлетворительные ре-

зультаты – максимум $F(\delta)$ достигается при выборе нескольких наиболее плотных областей звездообразования, по этой причине критерий $F(\delta)$ был задействован только на заключительном этапе подбора начальных параметров. Для алгоритма DBSCAN максимум $F(\delta)$ среди значений $(N_{\min}, \epsilon)$, приведенных выше, достигается при $N_{\min} = 4$ и $\epsilon = 50$ пк.

Результаты кластеризации модельных данных при помощи метода OPTICS показали, что значения начальных параметров $(N_{\min}, \chi)$, показывающих уровень полноты выборки идентифицированных скоплений $\zeta \gtrsim 0.7$, лежат в пределах $3 \leq N_{\min} \leq 6$ и $0 \lesssim \chi \lesssim 0.35$, причем, чем меньше минимальное число звезд в скоплении $N_{\min}$, тем шире границы допустимых значений χ . Как продемонстрировано на рисунке 3, выбор оптимального значения χ при фиксированной величине $N_{\min}$ затруднен, так как среднее расстояние до ближайшего скопления $\langle d_{\min} \rangle$ при $\zeta \gtrsim 0.7$ для каждого рассматриваемого $N_{\min} \leq 6$ практически не зависит от χ . Наименьшие значения $\langle d_{\min} \rangle$ достигаются при $0 \leq \chi \lesssim 0.07$ и $N_{\min} = 6$, при этом, как и в случае DBSCAN, разница в показателе $\langle d_{\min} \rangle$ между наилучшими решениями с $N_{\min} = 5$ и $N_{\min} = 6$ оказалась незначительной и составила менее 30 пк. Вследствие невысокой чувствительности индикатора $\langle d_{\min} \rangle$ к изменению минимального возможного числа звезд в скоплениях и наличия неопределенности с выбором параметра χ для каждого выбранного $N_{\min}$, аналогично подбору начальных параметров алгоритма DBSCAN, было выполнено сравнение нормированной флуктуации плотности $F(\delta)$ для пар значений $(N_{\min}, \chi)$ из представленных выше диапазонов, для которых $\zeta \gtrsim 0.7$, получив финальные начальные параметры кластеризации OPTICS равные $N_{\min} = 5$ и $\chi = 0.18$.

Таким образом, для исследования пространственного распределения массивных звезд в галактике М33 были использованы алгоритмы DBSCAN и OPTICS с начальными параметрами $N_{\min} = 4$, $\epsilon = 50$ пк и $N_{\min} = 5$, $\chi = 0.18$, соответственно. Результаты моделирования показали, что ввиду низкой абсолютной разницы получаемых $\langle d_{\min} \rangle$ в сравнении с характерным размером скоплений для областей диаграмм с $\zeta \gtrsim 0.7$, наилучшие результаты подбора пар значений $(N_{\min}, \epsilon)$ и $(N_{\min}, \chi)$ могут быть достигнуты лишь с использованием дополнительного статистического критерия $F(\delta)$, рассчитываемого на основе наблюдательных данных.

1.4 Результаты

В данном разделе были представлены основные результаты поиска групп наиболее массивных звезд в галактике М33, а также сравнение пространственных распределений LBV и некоторых других типов массивных звезд относительно центров масс найденных ОБ-ассоциаций.

На рисунке 4 продемонстрированы результаты пространственной кластеризации выборки из 2912 звезд с $M_{\text{init}} > 20 M_{\odot}$, полученной в разделе 1.1, при помощи алгоритмов DBSCAN и OPTICS с начальными параметрами, определенными в разделе 1.3. Как видно на рисунке 4, оба метода относительно хорошо справились с поиском наиболее компактных групп голубых звезд, а детальное сравнение результатов показало высокое сходство выборок скоплений, найденных при помощи DBSCAN и OPTICS. Однако, в протяженных плотных звездных областях, например, в центральной части галактики, алгоритм кластеризации OPTICS идентифицировал как члены групп лишь часть звезд из наиболее плотных частей подобных зон в соответствии с отношением последовательных расстояний на графике достижимости, что привело к заметной разнице между двумя алгоритмами в определении центров ОБ-ассоциаций, расположенных в некоторых скученных звездных полях. Также, некоторые малонаселенные группы звезд, состоящие из 4 звезд и расположенные преимущественно в отдаленных частях галактики М33, не были найдены алгоритмом OPTICS.

Для сравнительного анализа пространственного расположения массивных звезд различных типов относительно ОБ-ассоциаций были использованы две звездные выборки, представленные в разделе 2.1, а так же каталоги WR-звезд [149] и красных сверхгигантов (red supergiants, RSGs) [181] в галактике М33. Из-за различий в пространственном охвате галактики между наблюдениями были отфильтрованы красные сверхгиганты, расположенные дальше от ОБ-ассоциаций, чем наиболее изолированные голубые звезды ($\sim 840''$ или ~ 3.8 кпк). Функции распределения расстояний от LBVs/cLBVs, WRs, RSGs и ОБ-звезд до центров ближайших скоплений, идентифицированных при помощи DBSCAN и OPTICS, представлены на рисунке 5. Доверительные интервалы представленных распределений были получены на основе квантилей, рассчитанных с использованием метода "бутстрэп" [182], основанном на генерации повторных выборок. На рисунке 5 приведен 70% доверительный интервал распределения расстояний от LBVs/cLBVs до центров ближайших групп голубых

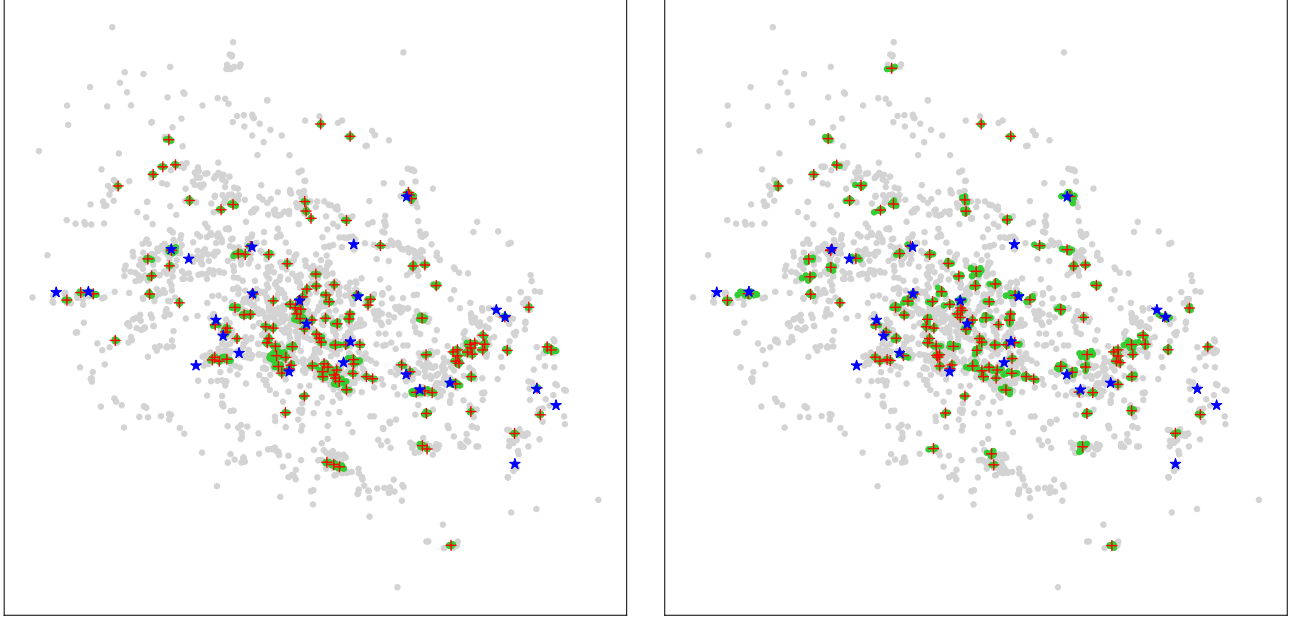


Рисунок 4 — Результат кластеризации выборки массивных звезд при помощи алгоритмов DBSCAN (слева) и OPTICS (справа). Зеленые точки соответствуют звездам идентифицированных ОБ-ассоциаций, фоновые объекты отмечены серым цветом. Центры масс звездных групп обозначены красными крестиками. LBVs и LBV-кандидаты показаны синими звездочками.

массивных звезд, также на рисунке 6 представлены 95% доверительные интервалы для объектов других звездных выборок.

Как показано на рисунке 5, алгоритм DBSCAN демонстрирует немного более низкое медианное значение расстояния до ближайшего проекционного центра ОБ-ассоциации по сравнению с OPTICS для всех распределений, что, возможно, указывает на лучшее качество кластеризации. Медианное расстояние для выборки массивных голубых звезд составляет $d_{\text{med}} \approx 112$ пк и $d_{\text{med}} \approx 120$ пк для DBSCAN и OPTICS, соответственно. В процессе кластеризации примерно 40% массивных голубых звезд были отмечены как члены ОБ-ассоциаций. Размер идентифицированных групп оценивался на основе среднего расстояния между ближайшими членами ассоциации с использованием формул (3) и (4) из работы [126]. Средний пространственный масштаб полученных звездных групп лежит в пределах 35 — 47 пк для DBSCAN и 47 — 63 пк для OPTICS в зависимости от предположения о равномерной плотности внутри ассоциации. Эти значения ближе к нижней границе типичных оценок размеров ОБ-ассоциаций $\sim 30 - 130$ пк, представленных в литературе [177–179], что позволяет заключить, что наша выборка скоплений содержит наиболее компактные и плотные

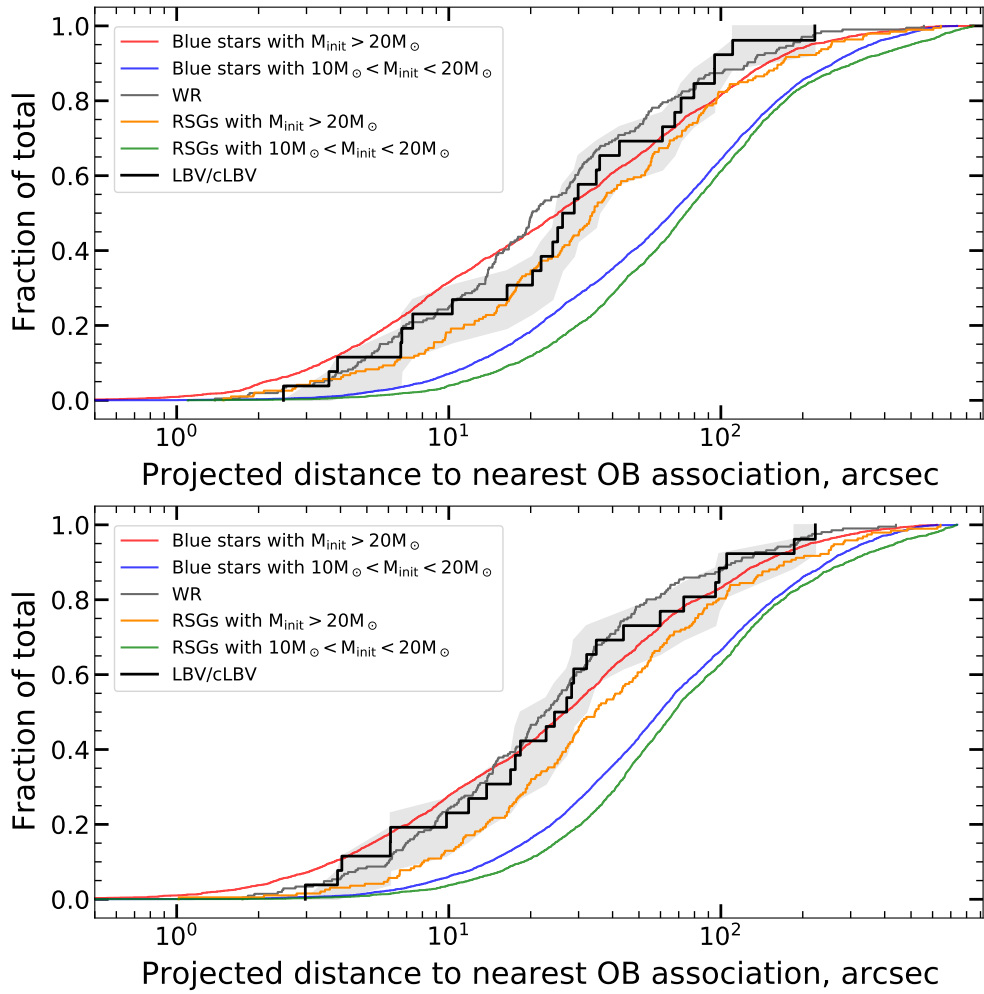


Рисунок 5 — Функция зависимости относительного числа объектов различных звездных выборок от проекционного расстояния до ближайших центров ОБ-ассоциаций, идентифицированных при помощи алгоритмов кластеризации DBSCAN (сверху) и OPTICS (снизу). 70% доверительный интервал для распределения расстояний, рассчитанного для выборки LBV/cLBV, показан серой заливкой.

группы голубых звезд. Полученные значения сравнимы с расстоянием, на которое звезда с начальной массой $20 - 25 M_{\odot}$ может удалиться от родительского скопления со скоростью $v_{\text{proj}} = 10 \text{ км с}^{-1}$ в течение стадии главной последовательности. Все приведенные выше оценки расстояний и размеров зависят от начальной параметризации скоплений, использованной в моделях звездных полей: например, уменьшение исходного количества звезд в скоплении или увеличение скорости выброса приводит к увеличению оптимального расстояния поиска в алгоритме DBSCAN, что обеспечивает более высокий уровень обнаружения скоплений на больших масштабах и, как следствие, меньшее медианное расстояние для выборки массивных голубых звезд и большие размеры звездных

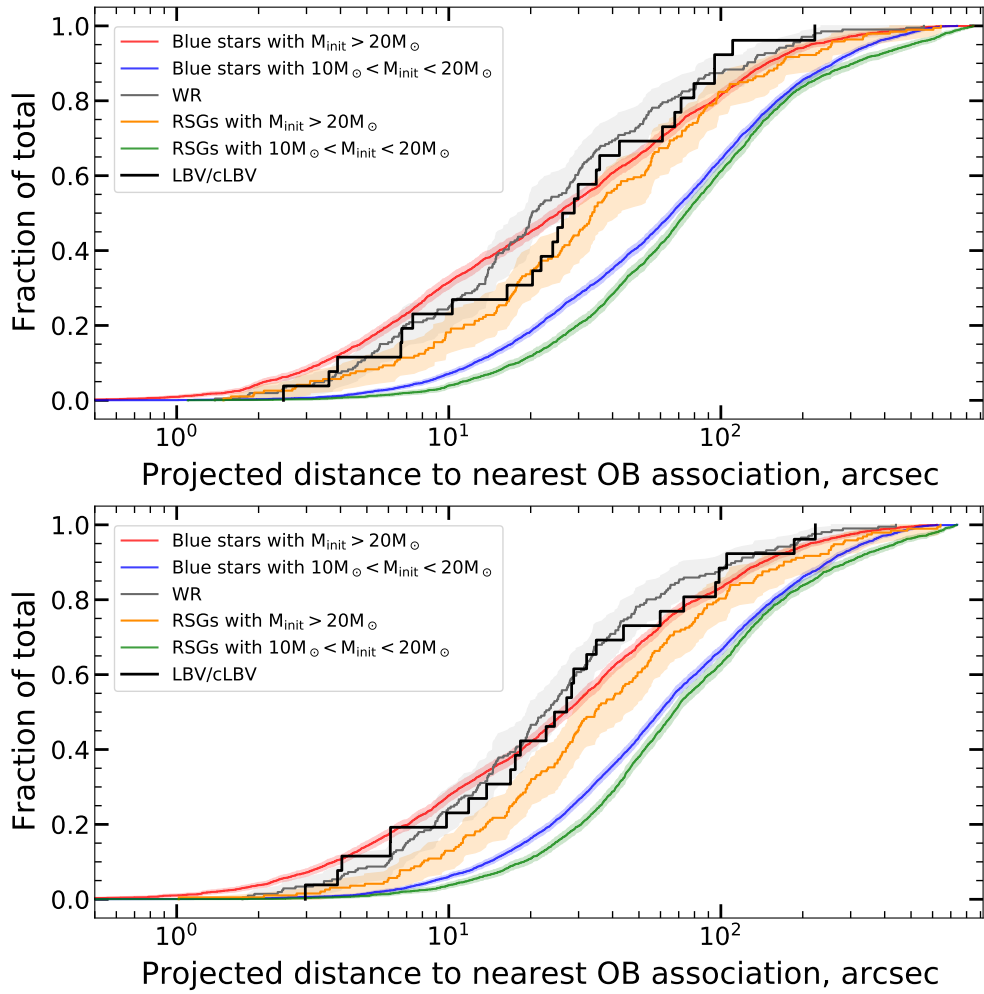


Рисунок 6 — Функция зависимости относительного числа объектов различных звездных выборок от проекционного расстояния до ближайших центров ОБ-ассоциаций аналогично рисунку 5. 95% доверительный интервал для распределений, рассчитанных для голубых звезд, красных сверхгигантов и звезд Вольфа-Райе, показан заливкой соответствующего цвета.

групп.

Наиболее близко к центрам ОБ-ассоциаций расположены звезды с начальной массой $M_{\text{init}} > 20 M_{\odot}$ и WR-звезды. Распределение голубых звезд с $M_{\text{init}} > 20 M_{\odot}$ оказалось близко к таковому для WR-звезд, не смотря на то, что они являются их более молодыми эволюционными предшественниками [7, 12], и, как следствие, должны показывать большую пространственную скученность относительно центров скоплений. Данный эффект можно объяснить ошибкой фотометрических данных, как было упомянуто в разделе 1.1, неопределенность измерений звездных величин в UBV фильтрах не позволяет однозначно выделить наиболее горячие звезды, таким образом в выборку попадут множество "старых", проэволюционировавших В-сверхгигантов с меньшими начальными

массами. В то же время, WR-звезды были однозначно идентифицированы [149] при помощи узкополосной фотометрии и спектроскопии, при этом неполнота выборки составила всего около 5%. Предположительно, на пространственное распределение выборки WR-звезд значимое влияние оказывают наиболее массивные звезды $M_{\text{init}} \gtrsim 40 M_{\odot}$, минующие фазу RSG [7]. Полученный результат хорошо согласуется с работой [149], в которой было отмечено, что большинство найденных WR-звезд находятся внутри ОВ-ассоциаций. Ввиду того, что эффективность выброса наиболее массивных одиночных звезд из скопления не высока [106], можно ожидать, что подобные объекты не успеют существенно удалиться от ОВ-ассоциаций [149, 153].

Красные сверхгиганты с начальными массами $M_{\text{init}} > 20 M_{\odot}$ (распределение обозначено оранжевой линией на рисунке 5) демонстрируют несколько большую изолированность относительно групп молодых групп в сравнении с голубыми звездам сопоставимых масс и WR-звездами. Однако, как показано на рисунке 6, 95% доверительный интервал распределения расстояний для выборки массивных красных сверхгигантов умеренно пересекает аналогичные доверительные интервалы распределений, рассчитанных для других типов массивных звезд. Таким образом, нельзя с высокой степенью достоверности утверждать, что красные сверхгиганты с массами $M_{\text{init}} > 20 M_{\odot}$ более изолированы в сравнении со звездами на более ранних или поздних стадиях эволюции.

Голубые звезды главной последовательности (синяя сплошная линия, рисунок 5) с меньшими массами $10 M_{\odot} < M_{\text{init}} < 20 M_{\odot}$ расположены существенно дальше от центров скоплений в сравнении с рассмотренными выше типами звезд. В свою очередь, красные сверхгиганты с начальными массами $10 M_{\odot} < M_{\text{init}} < 20 M_{\odot}$, как самые старые из рассматриваемых звезд, оказались наиболее удалены от ОВ-ассоциаций. Подобное пространственное распределение различных типов объектов относительно групп голубых массивных звезд соответствует базовым принципам звездной эволюции.

Функция зависимости относительного числа объектов от пространственных расстояний до ближайшего центра скопления для ярких голубых переменных (черная сплошная линия, рисунок 5) заметно отличается от распределений найденных для звезд с $10 M_{\odot} < M_{\text{init}} < 20 M_{\odot}$, и близка к распределению, показываемому наиболее массивными красными сверхгигантами с $M_{\text{init}} > 20 M_{\odot}$. Однако, как показано на рисунке 5, 70% доверительный интервал распределения

полученного для выборки LBV/cLBV полностью пересекает распределения, соответствующие другим наиболее массивным звездам. В совокупности с незначительной разницей между распределениями различных групп массивных звезд, это не позволяет ассоциировать пространственное расположение LBVs/cLBVs с одним из типов массивных звезд с $M_{\text{init}} > 20M_{\odot}$.

Обобщая результаты кластеризации, можно заключить, что распределение расстояний до ближайшей ОБ-ассоциации, полученное для выборки LBV/cLBV, ближе к распределению, найденному для массивных звезд с $M_{\text{init}} > 20M_{\odot}$ и WR-звезд. Однако, как можно заметить на рисунке 4, пространственное распределение LBVs/cLBVs является достаточно неоднородным: большая часть звезд находится вблизи центров ОБ-ассоциаций, в то же время, множество потенциально молодых массивных объектов оказались удалены от них на существенное расстояние. Сравнение расстояния до ближайшей ОБ-ассоциации для звезд разных подтипов из выборки LBV/cLBV показало, что наиболее изолированными объектами являются звезды с яркими эмиссиями Fe II (Fe II-звезды; "Fe II-emission stars", [151] или "iron stars", [183]). Медианная абсолютная болометрическая звездная величина для рассматриваемых Fe II-звезд составляет $M_{\text{bol}} = -9.0$ [118], что соответствует начальной массе звезды около $M_{\text{init}} \approx 30 M_{\odot}$ [7]. В то же время, пространственное распределение Fe II-звезд (черная штриховая линия, рисунок 5) оказалось схоже с полученным для голубых звезд и красных сверхгигантов со значительно меньшими массами $10M_{\odot} < M_{\text{init}} < 20 M_{\odot}$. Как видно на рисунке 7, распределения расстояний для выборки LBV/cLBV и Fe II-звезд, полученные с использованием различных алгоритмов поиска компактных звездных групп, имеют заметные различия. Визуальный анализ результатов кластеризации в окрестностях LBVs/cLBVs показывает, что OPTICS пропустил несколько малонаселенных групп в их окружении, идентифицированных DBSCAN, что повлияло на форму кривой функции распределения. Предположительно, в данном случае DBSCAN дает более корректные результаты. Тем не менее, независимо от используемого алгоритма кластеризации, Fe II-звезды выглядят более изолированными по сравнению с другими звездами из группы LBV/cLBV, однако малый размер выборки не позволяет сделать статистически значимых выводов.

В рамках более детального исследования LBVs/cLBVs, расстояния до центров ближайших ОБ-ассоциаций были сопоставлены с абсолютными звездными

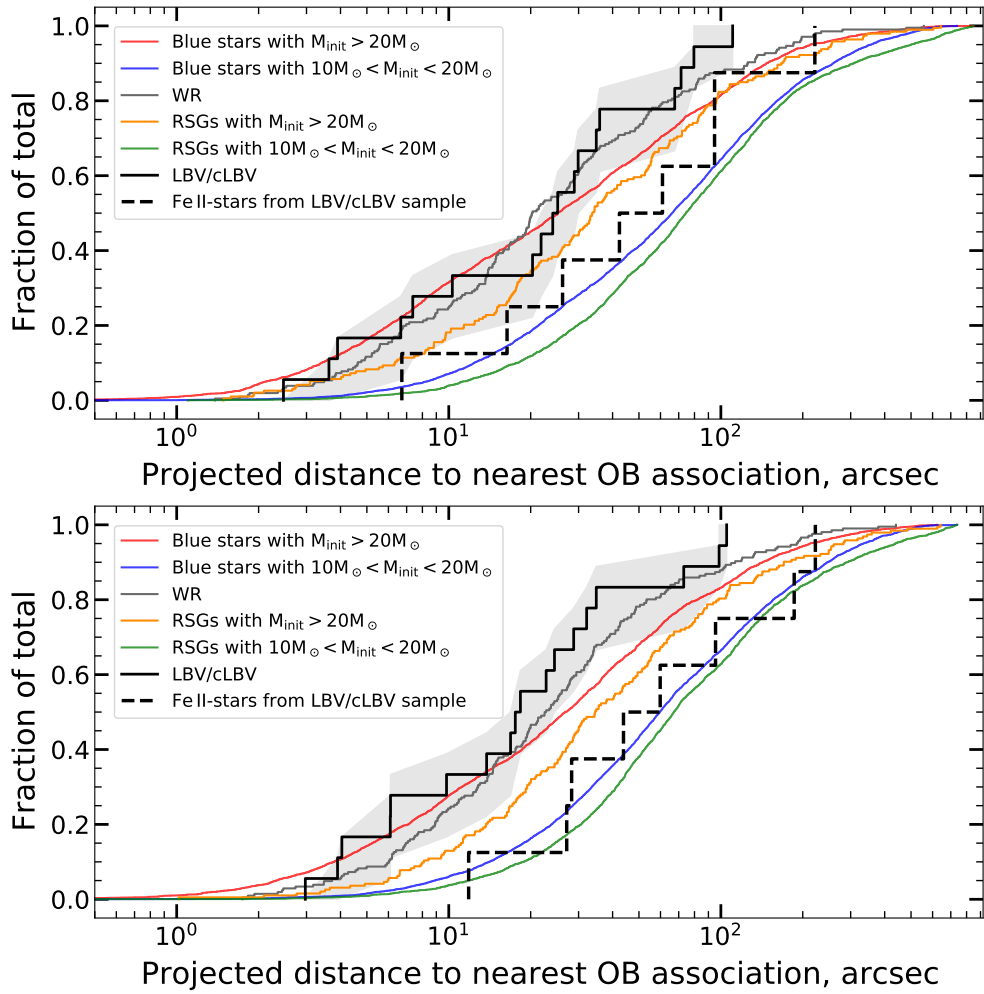


Рисунок 7 — Функция зависимости относительного числа объектов различных звездных выборок от проекционного расстояния до ближайших центров ОБ-ассоциаций аналогично рисунку 5. Звезды с яркими эмиссиями Fe II были отделены от выборки LBVs/cLBVs.

величинами объектов выборки и сгруппированы по подтипам [118, 152]. Полученные диаграммы представлены на рисунке 8. Наибольшую скученность вне зависимости от подтипа демонстрируют самые яркие и массивные звезды с $M_{\text{bol}} < -9.7$ и $M_{\text{init}} > 40 M_{\odot}$. Действительно, данным светимостям соответствуют молодые звезды с возрастами менее 5 млн лет, не проходящие стадию красного сверхгиганта [7]. Аналогичный результат был представлен в работе [54], в рамках которой было выполнено исследование распределения расстояний до ближайшей О-звезды для объектов выборки LBV/cLBV, разделенных на две подгруппы по потенциальным начальным массам.

Три из четырех подтвержденных LBV (Var B, Var C, Var 2) находятся вблизи ОБ-ассоциаций. Однако, Var 83, являющаяся одной из самых ярких звезд [118, 150], оказалось несколько изолирована от групп массивных звезд. В иссле-

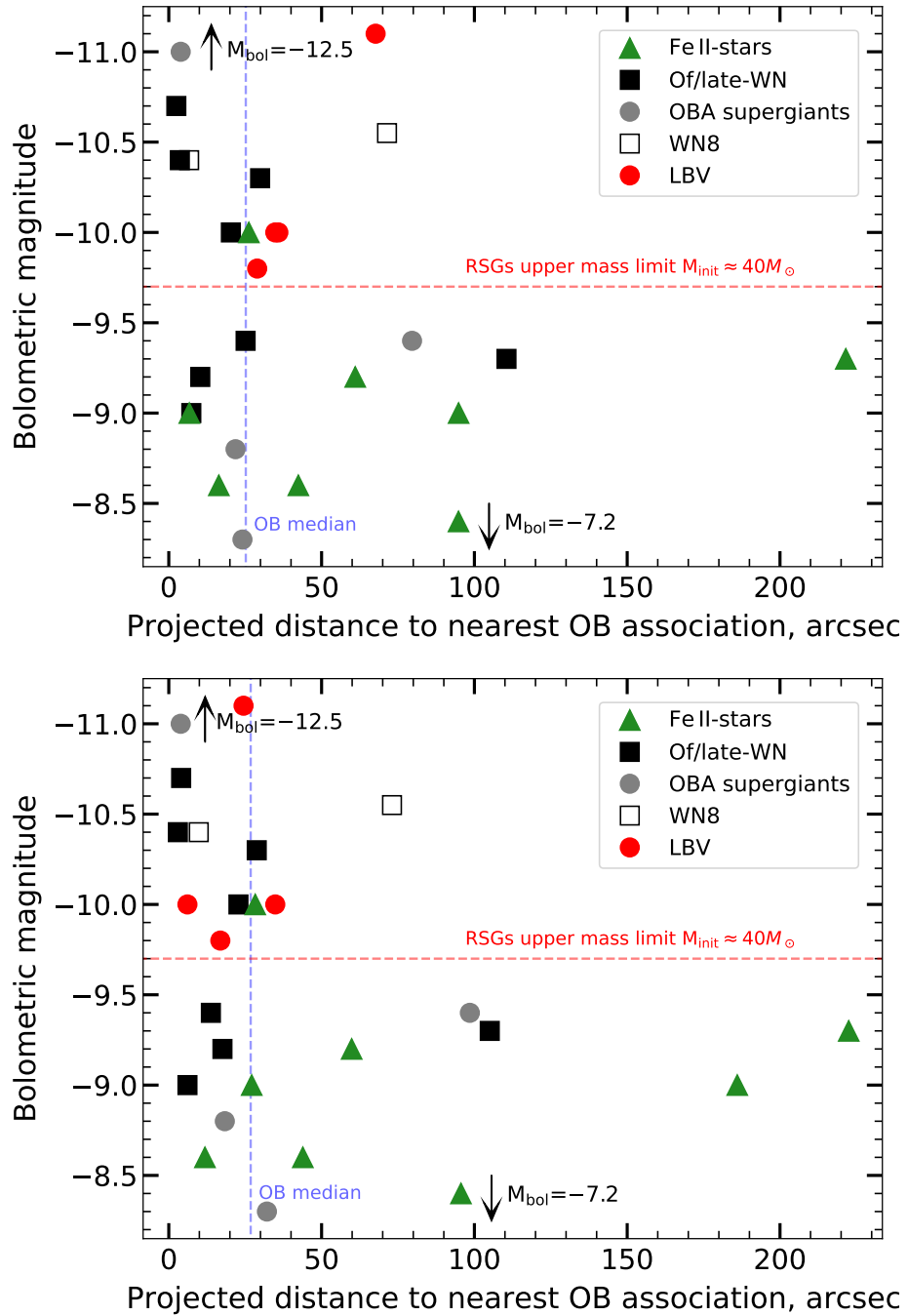


Рисунок 8 — Диаграмма зависимости абсолютной звездной величины от проекционного расстояния до центра ближайшей ОБ-ассоциации, идентифицированной при помощи алгоритма DBSCAN (сверху) и OPTICS (снизу), для объектов из LBV/cLBV выборки. Для сравнения медианное значение расстояния до ближайшей ОБ-ассоциации для выборки массивных голубых звезд показано синей пунктирной линией.

довании [54] также было отмечено, что Var 83 находится между двумя звездными ассоциациями A101 и A103 [175], при этом авторами было показано, что три звезды из ее ближайшего окружения имеют ранние спектральные классы.

Как видно на рисунке 8, наиболее близко к центрам компактных групп голубых звезд оказались расположены LBV-кандидаты типа Of/late-WN, и лишь одна подобная звезда показала расстояние значительно больше медианного для выборки горячих звезд с $M_{\text{init}} > 20 M_{\odot}$. В свою очередь, Fe II-звезды в среднем демонстрируют существенно большую изолированность в сравнении с звездами типа Of/late-WN сопоставимых светимостей. Отдельно стоит выделить две массивные звезды класса WN8 – WR123 (UIT303, HD177230) и V532 (GR290, Romano’s star). Данные объекты обладают более горячими атмосферами относительно звезд подгруппы Of/late-WN, при этом наблюдения этих звезд в прошлом показали наличие существенной спектральной и фотометрической переменности [184, 185]. На текущий момент V532 находится в стабильном состоянии, и предполагается, что звезда прошла транзитную фазу LBV и эволюционировала в звезду Вольфа-Райе [185]. В исследованиях как V532 [185], так и некоторых других WN8 звезд [186], отмечается их сравнительная удаленность от ближайших групп голубых звезд. На основе гипотезы, выдвинутой в работе [187], в исследовании [184] было выдвинуто предположение, что наличие пульсаций и пространственная изолированность ряда WN8 звезд может указывать на то, что подобные объекты являются продуктом слияния звезд в тесной двойной системе. Однако, отметим, что WR123, в отличие от V532, расположена в протяженной H II области и тесно окружена несколькими яркими голубыми звездами. Предположительно, WR123 может принадлежать данной компактной группе молодых звезд, которая была идентифицирована при помощи DBSCAN, но не была найдена алгоритмом OPTICS, что видно при сравнении диаграмм, показанных на рисунке 8.

1.5 Обсуждение

Согласно полученным результатам, пространственное распределение LBV/cLBV относительно центров ОБ-ассоциаций близко к распределениям, показываемым наиболее массивными звездами $M_{\text{init}} > 20 M_{\odot}$, а также звездами Вольфа-Райе, что соответствует стандартному предположению о природе ярких голубых переменных как промежуточной стадии эволюции одиноч-

ных массивных звезд. Не смотря на малое количество объектов в выборке LBV/cLBV, их пространственное распределение с учетом статистических ошибок значительно отличается от распределений показываемых менее массивными звездами с $10 M_{\odot} < M_{\text{init}} < 20 M_{\odot}$. Небольшой объем выборки LBV/cLBV мог повлиять на результаты в случае неравномерного распределения звезд, однако, как видно на рисунке 4, LBV/cLBV распределены относительно равномерно внутри галактики, при этом некоторые объекты располагаются в компактных звездных группах на периферии галактики с низкой плотностью фоновых звезд. Дополнительным источником неопределенности в измерении расстояний можно считать ошибку измерения центров скоплений, которая пропорциональна дисперсии расстояний от звезд скопления до его центра, и в среднем составила $3 - 4.3''$ ($13 - 19$ пк) в зависимости от используемого алгоритма кластеризации, а так же вероятную ошибку определения центров и положения отдельных звезд на уровне углового разрешения наблюдательных данных $\sim 1''$. Вероятно, что такие величины ошибок, не превосходящие характерный масштаб выбранных групп и существенно меньшие средних расстояний до ОВ-ассоциаций для всех выборок, не могли значительно повлиять на полученные результаты.

Кроме того, стоит упомянуть о зависимости результирующих распределений от начальных параметров скоплений, принятых при моделировании. На текущий момент природа ОВ-ассоциаций не до конца понятна [188], а критерии отбора членов варьируются от исследования к исследованию [132, 175, 177]. Фактически, ОВ-ассоциации часто имеют иерархическую структуру, где крупные звёздные группы могут делиться на более мелкие и так далее, что объясняет значительный разброс в оценках количества звезд и размеров в опубликованных работах. В текущей работе были использовано типичное количество звезд в скоплении, полученное из предыдущих исследований ОВ-ассоциаций на основе автоматических методов кластеризации со строгими критериями идентификации [126]. Изменение начальных свойств скоплений в моделях звездных полей приводит к различному оптимальному масштабу поиска для алгоритмов кластеризации и, следовательно, различному размеру идентифицированных ОВ-ассоциаций. В рамках исследования влияния начальных параметров моделирования на полученные распределения была выполнена кластеризация в широких диапазонах параметров как для DBSCAN ($N_{\text{min}} \in [3, 5]$, $\epsilon \in [30, 80]$ пк), так и

для OPTICS ($N_{\min} \in [4, 7]$, $\chi \in [0, 0.3]$). Как отмечалось в разделе 1.4, каждый набор параметров дает уникальные значения медианного расстояния для звездных выборок и среднего размера скоплений, однако, относительное положение и форма кривой функции распределения расстояний для LBVs/cLBVs и других массивных звезд в пределах принятых параметров существенно не изменяется.

Стоит отметить, что некоторые объекты выборки LBV/cLBV, в особенности Fe II-звезды, продемонстрировали существенную изоляцию в сравнении с массивными звездами с $M_{\text{init}} > 20 M_{\odot}$ или звездами Вольфа-Райе. Одним из вариантов объяснения подобного расхождения может быть предположение об эволюции Fe II-звезд в массивных двойных системах, которые могут быть выброшены с высокими скоростями на ранних стадиях эволюции скопления в ходе многочисленных тесных взаимодействий звездных систем [189, 190]. Для исследования данной гипотезы было выполнено сравнение пространственного распределения массивных двойных рентгеновских систем (high-mass X-ray binaries, HMXBs) с массой донора $M > 20 M_{\odot}$ [191] со распределениями, показываемыми звездами ряда других выборок, представленных в разделах 1.1 и 1.4. Ввиду локализации снимков в рентгеновском диапазоне лишь в центральных областях галактики M33, для исследования были использованы звезды из соответствующих частей галактики. Функции распределения расстояний от массивных двойных рентгеновских систем, голубых звезд и красных сверхгигантов до центров ближайших ОВ-ассоциаций продемонстрированы на рисунке 9.

Согласно полученным распределениям, HMXBs с массой донора $M > 20 M_{\odot}$, являвшимися в прошлом тесными массивными двойными системами, оказались более изолированы в сравнении с широкой выборкой голубых звезд и красных сверхгигантов с $M_{\text{init}} > 20 M_{\odot}$. Семь из восьми HMXBs оказались удалены более чем на $25 - 30''$ от ближайшего центра ОВ-ассоциации, что сравнимо с медианным расстоянием, полученным для выборки массивных голубых звезд ($\sim 20''$) в центральной части галактики M33. Пространственное распределение данных HMXBs оказалось близко к менее массивным звездам с $10 M_{\odot} < M_{\text{init}} < 20 M_{\odot}$. Полученный результат хорошо согласуется с исследованиями окружения различных HMXBs [192], в том числе ультраярких рентгеновских источников [193], большинство из которых находятся на периферии молодых звездных скоплений на расстояниях до нескольких сотен парсек. Таким образом, изоляция Fe II-звезд может быть потенциально объяснена эволю-

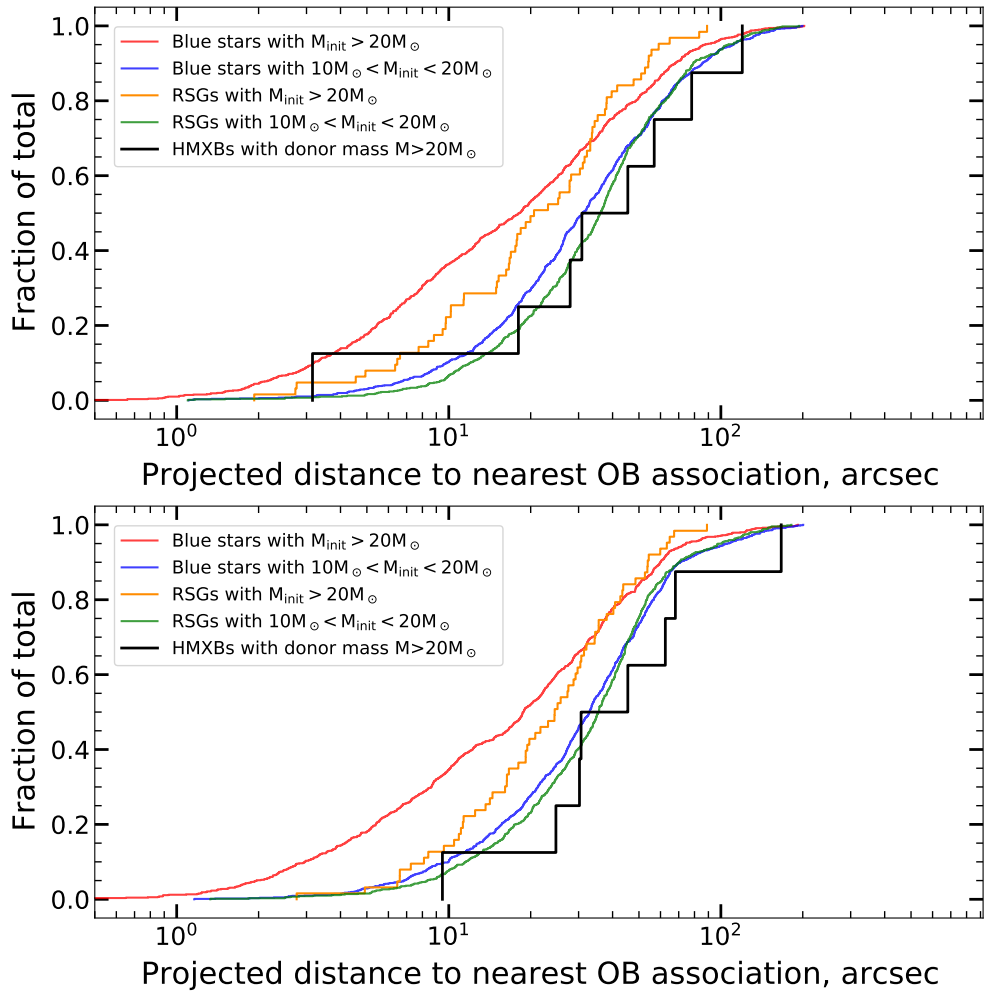


Рисунок 9 — Функция зависимости относительного числа объектов различных звездных выборок от проекционного расстояния до ближайших центров ОБ-ассоциаций аналогично рисунку 5, но рассчитанные только для центральной части галактики МЗЗ. Выборка LBV/cLBV была заменена на HMXBs.

цией в тесной двойной системе. Поскольку в литературных данных отсутствует информация об известных случаях аккреции вещества на компактный объект или других индикаторов двойственности Fe II-звезд на настоящий момент, можно предположить, что, дополнительное ускорение в пространстве этим звездам мог придать взрыв сверхновой, после которого они покинули двойную систему.

Косвенно на эволюцию Fe II-звезд в тесных звездных парах дополнительно указывают некоторые особенности спектра — в оптическом спектре подобных звезд присутствуют как линии Fe II, свойственные относительно холодным атмосферам $T_{\text{eff}} \lesssim 12000 \text{ K}$ [194, 195], так и яркие эмиссии He I, наблюдаемые в оптических спектрах звезд с большими температурами фотосферы $T_{\text{eff}} \gtrsim 16000 \text{ K}$ [73]. Причем в спектрах некоторых Fe II-звезд эмиссионные линии He I оказались шире линий Fe II, что трудно объяснить в рамках стандартной

сферически-симметричной модели звездного ветра. Подобный двухкомпонентный оптический спектр может формироваться в асимметричных ветрах быстро вращающихся звезд [9, 196], например, В[e]-сверхгигантов [151], скорость вращения которых, вероятно, близка к критической [99]. Однако, в отличие от sgB[e]s, Fe II-звезды, не смотря на общую схожесть оптических спектров, не обладают столь высокими скоростями вращения, на что указывает отсутствие декреционного диска [118].

Наличие значимой асимметрии ветра с разницей в темпе потери массы между полярным и экваториальным направлениями более чем на порядок может наблюдаться и при скоростях вращения существенно меньших критических, в случае, если звезда показывает высокие значения фактора $\Gamma = \frac{\kappa_{\text{es}} L}{4\pi c G M}$, особенно при температурах фотосферы $\log T_{\text{eff}} \lesssim 4.30$ [9]. В рамках гипотетического эволюционного сценария Fe II-звезды могли значительно раскрутиться при перетоке вещества с более массивного компаньона в тесной двойной системе, а затем замедлиться до более умеренных скоростей вращения при расширении в ходе дальнейшей эволюции, одновременно потеряв существенную часть массы в виде ветра, что позволило достигнуть больших значений Γ . Подобный эволюционный путь массивных звезд в двойной системе был представлен в работе [53] для описания возможного сценария эволюции LBV, объясняющего их наблюдаемую пространственную изоляцию. Как было отмечено в исследовании [53], светимость и текущая масса менее массивного компаньона после фазы перетока вещества не будет соответствовать его реальному возрасту, определенному при помощи эволюционных моделей для одиночных звезд. Данный сценарий эволюции может объяснить как относительную удаленность Fe II-звезд от OB-ассоциаций, так и некоторые особенности их наблюдаемого спектра.

1.6 Выводы главы 1

Исследование, представленное в главе 1, показало, что пространственное окружение большинства подтвержденных LBVs и кандидатов подтипа Of/late-WN в галактике M33, в отличие от Fe II-звезд, соответствует ожидаемым для наиболее массивных одиночных звезд. Этот результат, а так же совокупность доводов, приведенных в разделе 1.5, указывает на то, что природа Fe II-звезд и других рассматриваемых в данной работе объектов из выборки LBV/cLBV, вероятно, может существенно различаться, а сами Fe II-звезды потенциально

могут являться продуктом эволюции в тесной двойной системе. Несмотря на то, что недостаточная статистика LBV/cLBV звезд в рамках исследований одной галактики не позволяет однозначно говорить о закономерностях расположения звезд данного типа и, как следствие, эволюционном статусе, некоторые полученные результаты в отношении индивидуальных объектов совпали с результатами, полученными при визуальном исследовании их звездного окружения другими авторами. Дальнейшее исследование пространственного распределения LBVs/cLBVs в других галактиках и увеличение числа известных LBVs/cLBVs позволит сделать более определенные выводы о происхождении данных объектов.

Глава 2. Моделирование оптического и инфракрасного спектров Галактического LBV-кандидата MN112

В качестве отправной точки в исследовании спектров звезд предельной светимости был выбран галактический LBV-кандидат MN112. На основе спектров данной звезды в ходе исследования был отработан подход, позволяющий достаточно точно оценивать параметры подобных объектов. Например, с хорошей точностью была определена температура звезды даже при отсутствии явных чувствительных индикаторов в спектре (например, баланса линий гелия, соответствующим разным стадиям ионизации). В данной главе было акцентировано внимание на определении основных звездных параметров MN112, а также их сравнении с ее прототипом – яркой голубой переменной P Cygni.

2.1 Галактический LBV-кандидат MN112 и его прототип LBV P Cygni

Впервые MN112 была исследована в работе [197] и отнесена к кандидатам в LBV-звезды по результатам изучения туманности в ИК-диапазоне и анализа оптического спектра, который близок к спектру LBV P Cygni. В работе предложено два возможных варианта расположения звезды: около рассеянного скопления NGC 6823 (2 – 3.5 кпк) или в рукаве Персея (> 7 кпк). MN112 не показывает переменности типа S Dor, ее изменения яркости составляют менее 0.2 mag. В спектре MN112 присутствует лишь одна запрещенная линия [N II] $\lambda 5755$, которая, вероятно, образуется в отдаленных частях ветра. Предполагается, что MN112 относится к классу "спящих" ярких голубых переменных, прототипом которых является P Cygni.

P Cygni – одна из первых идентифицированных LBV, которая относится к числу самых ярких звезд в нашей Галактике. Она была обнаружена во время вспышек 1600 и 1655 годов длительностью несколько лет, которые сопровождались увеличением звездной величины до 3 mag [13]. Начиная с 1715 года P Cygni является звездой пятой звездной величины с небольшими изменениями яркости на коротких промежутках времени и увеличением звездной величины на 0.15 mag за столетие, связанным с понижением температуры на 6% при

постоянной светимости [198]. На сегодняшний день звездная величина Р Cygni составляет 4.8 mag с небольшим изменением блеска ± 0.05 mag на малых промежутках времени [199].

Спектроскопические исследования Р Cygni были выполнены в работах [73, 200], в которых были определены температура $T = 18700\text{ K}$, радиус $R = 76 R_{\odot}$ и темп потери массы $\dot{M} = 3.3 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$. Первые оценки расстояния до Р Cygni 1.7 и 1.8 кпк были основаны на принадлежности звезды к скоплению IC 4996, которое является частью звездной ассоциации Cyg OB1 [73, 201]. Терминальная скорость ветра $v_{\infty} = 185 \text{ km s}^{-1}$ была измерена по многочисленным запрещенным линиям [Fe II] и [N II] $\lambda 5755$ [202], а также [Ne II] 12.81 мкм, [Ne III] 15.55 мкм [203].

2.2 Наблюдательные данные

В исследовании был использован спектр MN112, полученный с помощью спектрографа TWIN обсерватории Калар-Альто (Испания) 5 мая 2009 года в спектральных диапазонах 3500–5600 Å и 5300–7600 Å. Спектральное разрешение составило 3.4 Å при качестве изображения звезд $\simeq 1.3''$. Спектр в ближнем ИК-диапазоне был получен на спектрографе TripleSpec [204] 3.5-метрового телескопа ARC обсерватории Апачи-Пойнт (Нью-Мексико, США) в ноябре 2012 года в спектральном диапазоне 0.95–2.46 мкм со средним разрешением 5 Å.

Дополнительно, был задействован спектр MN112, полученный на 6-метровом телескопе БТА с использованием редуктора светосилы SCORPIO [205] 21 июня 2009 года в спектральных диапазонах 4030–5830 Å и 5730–7500 Å. Спектральное разрешение составляло 5 Å, размер изображения звезд $\simeq 1.5''$. Обработка данных осуществлялась при помощи стандартных процедур.

2.3 Код CMFGEN

Для моделирование наблюдаемых спектров в рамках представленной диссертации был использован код CMFGEN. Код представлен в свободном доступе² в виде исходных файлов на языке FORTRAN. Расчет сложных моделей может занимать несколько часов и более, поэтому для оптимизации вычислений был

²<http://kookaburra.phyast.pitt.edu/hillier/web/CMFGEN.htm>

использован компилятор Intel Fortran Compiler³, математическую библиотеку OpenBLAS⁴, а так же OpenMP для реализации многопоточных вычислений.

CMFGEN представляет достаточно широкие возможности для работы с синтетическими спектрами через интерфейсы к графической библиотеке PGPLOT⁵. Дополнительно, была разработана собственная графическая программа на платформе Qt для более простого и быстрого интерактивного анализа спектров, что особенно полезно при работе с большим количеством моделей.

CMFGEN код применяет не-ЛТР подход для одновременного решения уравнений переноса и статистического равновесия с учетом покровного эффекта. Поле скоростей в рассчитываемых моделях протяженных атмосфер представляет собой комбинацию решения уравнения гидростатического равновесия в изотермальной атмосфере с эффективной высотой h_{eff} и аналитического β -закона распределения скорости в ветре [203, 206]:

$$v(r) = \frac{v_0 + (v_\infty - v_0)(1 - R_*/r)^\beta}{1 + (v_0/v_{\text{core}}) \exp[(R_* - r)/h_{\text{eff}}]} \quad (4)$$

где β — показатель степени, параметризующий ускорение ветра с расстоянием от центра звезды; v_{core} — скорость на внутреннем гидростатическом радиусе R_* ($\tau_{\text{Ross}} \gtrsim 20$); h_{eff} — эффективная изотермальная шкала атмосферы; v_0 — параметр⁶, определяющий распределение скорости газа в переходной зоне между нижними слоями атмосферы и ветром; v_∞ — терминальная скорость ветра.

Код включает в себя возможность учета наличия оптически тонких сгустков (клампов) вещества в ветре. Для учета возможной неоднородности ветра в моделях CMFGEN используется объемный фактор заполнения ветра f , модифицирующий плотность вещества $\rho_{\text{cl}} = \rho/f$ [66]. Коэффициенты излучения и поглощения зависят от плотности квадратично, а вероятность электронного рассеяния — линейно. Поэтому, по сравнению с моделями со сплошным ветром, в моделях с клампингом крылья ярких линий, возникающие, главным образом, из-за электронного рассеяния, оказываются слабее [207]. Фактор заполнения f и темп потери массы являются взаимозависимыми параметрами. Темп потери массы в модели с однородным ветром $\dot{M}$ и в модели учитывающей наличие сгустков вещества $\dot{M}_{\text{cl}}$, описывающими один и тот же наблюдаемый спектр,

³По результатам тестов, он показывает наилучшую производительность

⁴<https://github.com/xianyi/OpenBLAS>

⁵<https://sites.astro.caltech.edu/~tjp/pgplot/>

⁶Эту скорость обычно называют фотосферной, хотя ее значение отличается от скорости на $\tau_{\text{Ross}} = 2/3$

связаны между собой соотношением $\dot{M}_{\text{cl}} = \dot{M} f^{-0.5}$. Наиболее часто при моделировании ветров используется экспоненциальный закон для описания изменения величины f (отношение объема заполненного веществом ко всему объему) в ветре: [66]:

$$f(r) = f_0 + (1 - f_0) \exp\left(-\frac{v(r)}{v_{\text{cl}}}\right) \quad (5)$$

где f_0 – максимальное значение объемного фактора заполнения, достигаемое в ветре, v_{cl} – примерное значение скорости на которой начинают возникать неоднородности. Далее, при описании моделей, использующих данный вид параметризации распределения неоднородностей в ветре, под величиной f будет подразумеваться значение наибольшей относительной плотности сгустков вещества f_0 .

Рассчитываемые с помощью этого кода модели характеризуются набором параметров, таких как фундаментальные параметры звезды (L , R_*), параметры ветра ($\dot{M}$, v_∞ , β), химический состав, а также ряд дополнительных параметров, среди которых турбулентная скорость v_{turb} , а так же объемный фактор заполнения f . Среди данных параметров только терминальную скорость v_∞ можно определить независимо по спектру, для остальных параметров необходимо построить соответствующие модельные сетки в зависимости от свойств объекта или использовать дополнительные предположения.

2.4 Методы определения параметров протяженной атмосферы MN112

Определение терминальной скорости ветра звезд типа Р Cygni по оптическим спектрам возможно на основе измерений полуширины (full width at half maximum, FWHM) запрещенных линий, которые формируются в отдаленных частях ветра с приблизительно постоянной скоростью, например, по некоторым линиям железа [Fe II] и линии [N II] $\lambda 5755$ [202].

Также оценки терминальной скорости могут быть получены из смещения абсорбционного компонента сильных эмиссионных линий водорода и гелия в голубую сторону. Спектральное разрешение существенно влияет на эти оценки. Стоит отметить, что эти оценки зависят от параметра β в скоростном законе ветра. При высоких значениях β абсорбционный компонент Р Cyg профиля сме-

щается к эмиссионному компоненту, в то время как эмиссионный компонент уменьшается в ширине, но усиляется в центре линии [73].

Независимые оценки значений температуры фотосферы MN112 по оптическому спектру могут быть определены по измерениям отношения линий, соответствующих разным стадиям ионизации одного элемента (например, Si II/Si III). В данной работе также были использованы дополнительные критерии для более точного определения температуры звезды.

Небольшое понижение температуры фотосферы может привести к существенным изменениям в ионизационной структуре ветра и увеличению непрозрачности в резонансных линиях водорода (Лаймановская серия) [73]. В результате, абсорбционный компонент P Cyg профилей линий Бальмеровской серии показывает сильную зависимость от ионизационного состояния ветра и может быть использован для оценок температуры и темпа потери массы [208].

Оценки нижней границы возможных значений температуры были основаны на присутствии в оптическом спектре MN112 достаточно интенсивных линий N II $\lambda 5001$, $\lambda 5047$ and $\lambda 6486$, $\lambda 6610$, а также чувствительной к изменениям температуры группы линий N II $\lambda 5915$ – 5960 и Fe III $\lambda 5919$ – 5964 .

Для определения ионизационной структуры ветра в работе были использованы отношение линий кремния Si III $\lambda 4554$ /Si II $\lambda 6347$, абсорбционный компонент линии H_β и группу чувствительных к температуре линий, представленную выше.

Увеличение фотосферной скорости v_0 приводит к уменьшению радиуса фотосферы $R_{2/3}$ (радиуса, на котором Росселандова средняя оптическая глубина $\tau_{\text{Ross}} = 2/3$) и увеличению эффективной температуры T_{eff} . Дополнительно, фотосферный радиус $R_{2/3}$ (и как следствие эффективная температура T_{eff}) сильно зависят от выбора скоростного закона β в ветрах с высокой плотностью вещества при $v_0 > v_{\text{sonic}}$. Точные оценки фотосферного радиуса не могут быть получены из оптического спектра. Фотосферная скорость может быть определена из моделирования линий водорода и гелия в ИК-диапазоне. Эквивалентная ширина линий в ИК-диапазоне зависит от изменения уровня континуума [209]. Существенный вклад в изменения континуума в этом диапазоне дают свободно-свободные процессы излучения в ветре.

Во всех рассчитанных моделях протяженный атмосферы MN112 использовалась параметризация распределения сгустков вещества в ветра, заданная вы-

ражением 5. Уровень микронеоднородностей в ветре по оптическим спектрам может быть определен по силе крыльев линий H_α , H_β . Темп потери массы, скорректированный за объемный фактор заполнения $\dot{M}_{cl}$, в моделях был принят постоянным для сохранения значений эквивалентных ширин линий водорода и гелия при изменении величины f . Предполагалось, что неоднородности слишком незначительны на малых скоростях, и неустойчивости ветра начинают играть более значимую роль начиная со скоростей $v_{cl} = 100 \text{ км с}^{-1}$ [210, 211]. Выбор скорости, с которой в модели протяженной атмосферы будут добавлены микронеоднородности v_{cl} , очень важен для определения ионизационной структуры ветра. Например, уменьшение v_{cl} с 100 км с^{-1} до 30 км с^{-1} в моделях значительно усиливало линии Fe II 5169, Si II в дополнение к линиям водорода и гелия, в то время как множество линий N II и Fe III становились значительно слабее. Модели с $v_{cl} = 30 \text{ км с}^{-1}$ требуют гораздо больших эффективных температур, чтобы хорошо описать линии N II $\lambda 5915\text{--}5960$ и Fe III $\lambda 5919\text{--}5964$, $\lambda 5127$, $\lambda 5156$. В моделях с большими температурами водород остается ионизованным даже в дальних частях ветра. Абсорбционные компоненты линий Бальмеровской серии в этих моделях плохо согласуются с наблюдаемыми профилями. Изменения фактора заполнения f при $v_{cl} = 100 \text{ км с}^{-1}$ в значительной степени влияет на линии водорода, гелия, а также линии Fe II 5169 и Si II.

Турбулентную скорость v_{turb} в ветре можно оценить по смещению сильных линий водорода и He I в красную часть спектра. В линиях с большой оптической глубиной (например, H_α , H_β), большинство излученных фотонов будут перепоглощены внутри резонансной зоны. В таком случае, вероятность того, что фотоны будут рассеяны на электронах, очень велика. В результате рассеяния фотоны не могут быть перепоглощены снова внутри резонансной зоны и вылетают за ее пределы [207]. Также значения турбулентной скорости влияют на силу абсорбционных компонентов линий.

Светимость была определена при аппроксимации фотометрических данных при помощи модельного спектра с использованием соответствующих фильтров. Наилучшая модель была пересчитана для новых значений светимости, радиуса и темпа потери массы при одинаковой эффективной температуре используя соотношения $L \sim R^2$ и $L \sim \dot{M}^{4/3}$. Более точные формулы пересчета для звезд типа P Cygni представлены в работе [73].

После определения основных параметров звезды (L , T_{eff} , $\dot{M}$, v_∞), был ис-

следован химический состав вещества в протяженной атмосфере. Определены содержания основных элементов, таких как H, He, C, N, Si, Fe. Соотношения между линиями H_α , H_β , H_γ и He I были использованы для расчета доли водорода в ветре. Содержания углерода и азота были определены по аппроксимации линий C II $\lambda 7231$, $\lambda 7236$ и N II $\lambda 5047$, $\lambda 5001$ - $\lambda 5010$, соответственно.

2.5 Результаты

Параметры наилучшей модели звезды MN112 представлены в таблице 1. В качестве модели P Cygni была принята модель, представленная в работе [200]. Наблюдаемый⁷ и модельный оптические спектры MN112 в нормированном виде с отмеченными наиболее важными линиями представлены на рисунке 10. Выбранные линии в оптическом и ближнем ИК-диапазоне и наилучшая модель представлены на рисунках 11 и 12, соответственно. Для сравнения со спектром MN112 был использован спектр P Cygni, представленный в работе [197]. Оптические спектры P Cygni и MN112 имеют идентичный набор линий: линий водорода Бальмеровской серии, He I, N II, Si II и Fe III. Обе звезды имеют слабые абсорбционные компоненты в линиях Бальмеровской серии и сильные P Cyg профили в линиях He I, N II and Fe III.

В работе были использованы несколько моделей ветра для исследования влияния низкого разрешения на профиль некоторых линий с абсорбционным компонентом. На рисунке 13 изображены профили линий H_α и H_β наилучшей модели при разных температурах с низким и высоким разрешениями. Абсорбционные компоненты в горячей модели практически неразличимы и только асимметричные крылья в H_β указывают на наличие абсорбционного компонента. Дальнейшее увеличение температуры не приводит к значительным изменениям профиля линии H_α при низком разрешении.

Спектр MN112 показывает более сильные эмиссионные линии N II (например, $\lambda 5047$, $\lambda 5001$ - $\lambda 5010$, $\lambda 5915$ - $\lambda 5960$, $\lambda 6486$, $\lambda 6610$), Si II ($\lambda 5056$, $\lambda 6348$, $\lambda 6371$) и Fe III ($\lambda 5127$, $\lambda 5156$, $\lambda 5919$ - $\lambda 5964$) относительно P Cygni. В спектрах обеих звезд отсутствуют линии He II и N III, но наблюдаются слабые линии C II $\lambda 7231$, $\lambda 7236$. Линии углерода расположены на правой границе наблюдаемых оптических спектров. Точные оценки содержания углерода не могут быть получены

⁷Поглощение межзвездной средой на красном крыле линии H_β в спектре, полученном с помощью TWIN, было скорректировано для более наглядного сравнения с модельным спектром

Таблица 1 — Основные параметры моделей и химические составы MN112 и P Cygni; (a) параметры модели были взяты из работы [200]; (b) $R_{2/3}$ и T_{eff} — радиус и температура на $\tau_{\text{Ross}} = 2/3$, T_* — температура на гидростатическом радиусе R_* ($\tau_{\text{Ross}} \gtrsim 20$); (c) Параметры воспроизведенной CMFGEN модели P Cygni.

	MN112	P Cygni
d [kpc]	6.93	1.8
L_* [$L_\odot$]	5.77×10^5	6.1×10^5
R_* [$R_\odot$] ^b	49	76
$R_{2/3}$ [$R_\odot$] ^b	110	105^c
T_* [kK] ^b	22.8	18.7
T_{eff} [kK] ^b	15.2 ± 0.5	15.9^c
$\dot{M}_{\text{cl}}$ [$M_\odot/\text{год}$]	$(5.74 \pm 1.0) \times 10^{-5}$	3.3×10^{-5}
v_∞ [км с ⁻¹]	300 ± 10	185
v_0 [км с ⁻¹]	< 15	30
v_{turb} [км с ⁻¹]	25 ± 10	15
β	3.4 ± 0.2	2.5
f	0.4 ± 0.05	0.5
$X_{\text{He}}/X_{\text{H}}$	0.37 ± 0.05	0.29
$X_{\text{N}}/X_\odot$	6.8 ± 1.5	6.8
$X_{\text{C}}/X_\odot$	< 0.1	0.3
$X_{\text{O}}/X_\odot$	-	0.2
$X_{\text{Si}}/X_\odot$	1.0 ± 0.1	1.1
$X_{\text{Fe}}/X_\odot$	1.0 ± 0.2	1.0
Ref	Эта работа	(a)

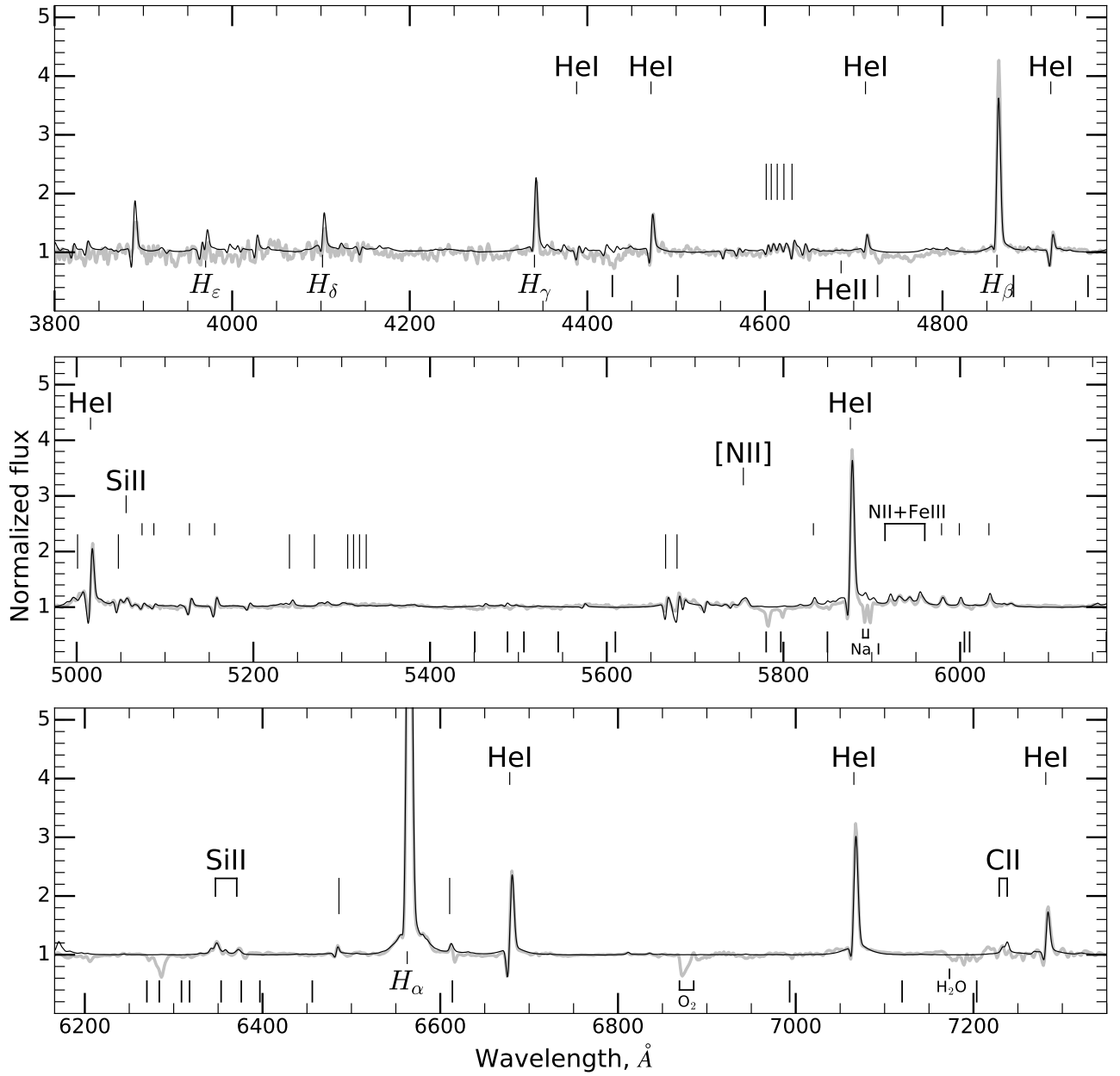


Рисунок 10 — Нормированный оптический спектр MN112 (сплошная серая линия) и лучший модельный спектр (сплошная черная линия). Линии N II и Fe III обозначены над спектром длинными и короткими вертикальными линиями, соответственно. Диффузные полосы межзвёздного поглощения обозначены черными линиями под спектром.

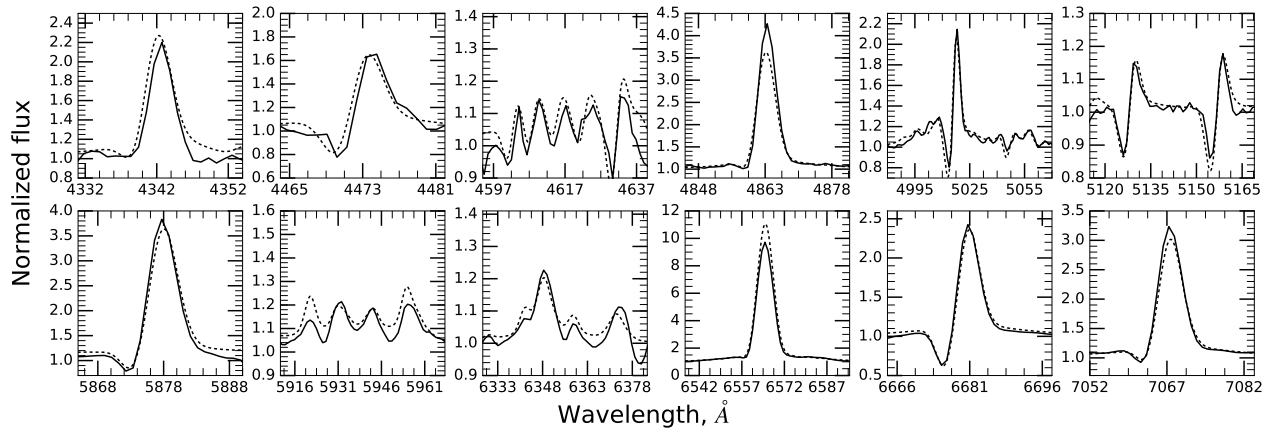


Рисунок 11 — Сравнение выбранных оптических линий в наблюдаемом спектре MN112 (сплошная черная линия) с CMFGEN моделью (пунктирная черная линия). Верх, слева направо: $H\gamma$; He I $\lambda 4471$; N II $\lambda 4601-4643$; $H\beta$; He I 5015, N II $\lambda 5045$, Si II $\lambda 5040$, $\lambda 5055$; Fe III $\lambda 5127$, $\lambda 5156$. Низ: He I $\lambda 5876$; Si II $\lambda 5916$, $\lambda 5959-5961$, N II $\lambda 5915-5960$, Fe III $\lambda 5919-5964$; Si II $\lambda 6348$, $\lambda 6371$; $H\alpha$; He I $\lambda 6678$, He I $\lambda 7065$.

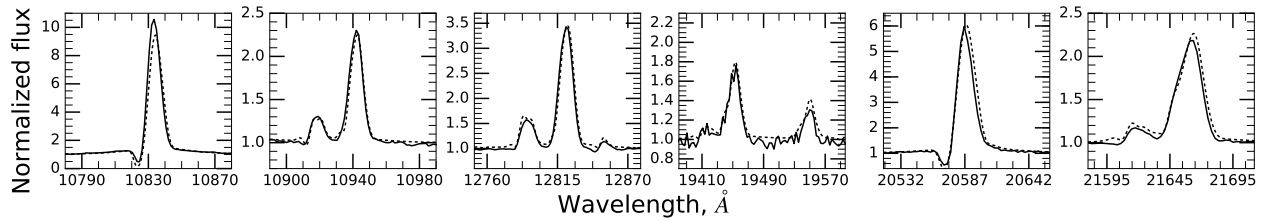


Рисунок 12 — Сравнение выбранных линий в ближнем ИК-диапазоне в наблюдаемом спектре MN112 (сплошная черная линия) с CMFGEN моделью (пунктирная черная линия). Слева направо: He I $\lambda 10830$; He I $\lambda 10913$, $\lambda 10917$, H I (Pa γ) $\lambda 10938$; He I $\lambda 12783-12846$, H I (Pa β) $\lambda 12818$; He I $\lambda 19434-19543$, H I (Br δ) $\lambda 19445$; He I $\lambda 20581$; He I $\lambda 21617-21649$, H I (Br γ) $\lambda 21655$.

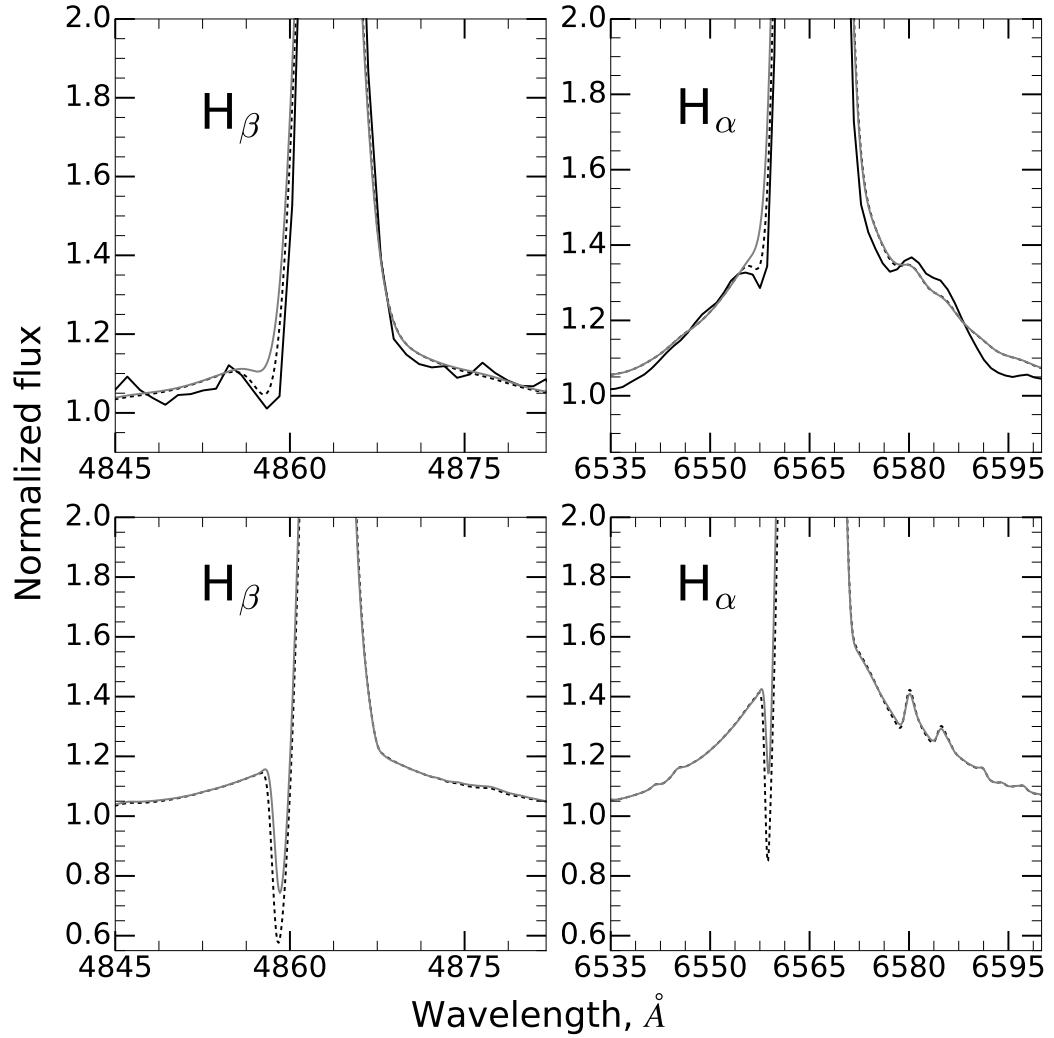


Рисунок 13 — Профиль абсорбционного компонента линий H α и H β в модельном спектре MN112. Наблюдаемый спектр отмечен сплошной черной линией. Наилучшая модель с эффективной температурой $T_{\text{eff}} = 15.2$ кК — пунктирная черная линия. Модель с большей температурой $T_{\text{eff}} = 15.5$ кК — сплошная серая линия. Верх: модельный спектр сглаженный со спектральным разрешением, соответствующим наблюдаемому спектру (3.4 Å). Низ: модельный спектр с высоким спектральным разрешением 0.1 Å.

ввиду низкого соотношения сигнал/шум в этой области спектров. В спектре MN112 отсутствуют линии Fe II и [Fe II]. В наблюдаемые оптические спектры MN112 не вошли линии кислорода.

Для всех моделей протяженной атмосферы MN112 был использован фиксированный радиус $R_* = 49 R_\odot$. Для сохранения плотности ветра одинаковой среди моделей с разными температурами T_* на гидростатическом радиусе R_* , изменение температуры на осуществлялось при помощи вариации светимостей, а не радиусов. В работе были использованы два оптических спектра MN112 для оценок температуры. Спектр MN112, полученный с использованием спектрографа SCORPIO, имеет меньшее спектральное разрешение $5 \text{ \AA}$, но большее соотношение сигнал/шум относительно спектра, снятого с помощью спектрографа TWIN. На рисунке 14 представлена наилучшая модель ветра MN112 с разными температурами вместе с наблюдаемым спектром. Как видно из рисунка 14, даже незначительное понижение температуры ($\approx 1 \text{ kK}$) может существенно увеличить силу абсорбционного компонента линии H_β и усилить линии Si II и Fe II. Линии Si II и Fe II показывают сильную зависимость от плотности и ионизационной структуры ветра, большой вклад в относительное содержание ионов Si II, Fe II в отдаленных частях ветра вносят реакции перезарядки.

Линии Fe III $\lambda 5127$, $\lambda 5156$ не показывают значимой зависимости от температуры, в то время как линия Fe II $\lambda 5169$ значительно усиливается при уменьшении температуры. Группы линий N II и Fe III в диапазоне $\lambda 5915\text{--}5964$ (особенно линии N II $\lambda 5915\text{--}5960$) сильно зависят от изменений ионизационной структуры ветра.

В ходе работы было рассчитано более 100 моделей в диапазонах $\dot{M}_{\text{cl}} = 3.0\text{--}7.0 \times 10^{-5} M_\odot \text{yr}^{-1}$ и $T_* = 19\,000\text{--}23\,000 \text{ K}$ с разными скоростными распределениями (см. ниже) для более точного определения темпа потери массы и температуры. Оценки эффективной температуры и темпа потери массы составляют $T_{\text{eff}} = 15200 \pm 500 \text{ K}$ и $\dot{M}_{\text{cl}} = (5.47 \pm 1.0) \times 10^{-5} M_\odot \text{yr}^{-1}$, соответственно. Нескорректированный за объемный фактор заполнения темп потери массы составляет $\dot{M} = 3.63 \times 10^{-5} M_\odot \text{yr}^{-1}$

Межзвездное поглощение $A_v = 8.45 \pm 0.11$ было определено при помощи аппроксимации фотометрических данных в фильтрах $B=17.13 \pm 0.12$, $V=14.53 \pm 0.03$, $I_C=11.15 \pm 0.03 \text{ mag}$ [197] наилучшей моделью с эффективной температурой $T_{\text{eff}} = 15\,200 \text{ K}$ при помощи кривых поглощения, представленных

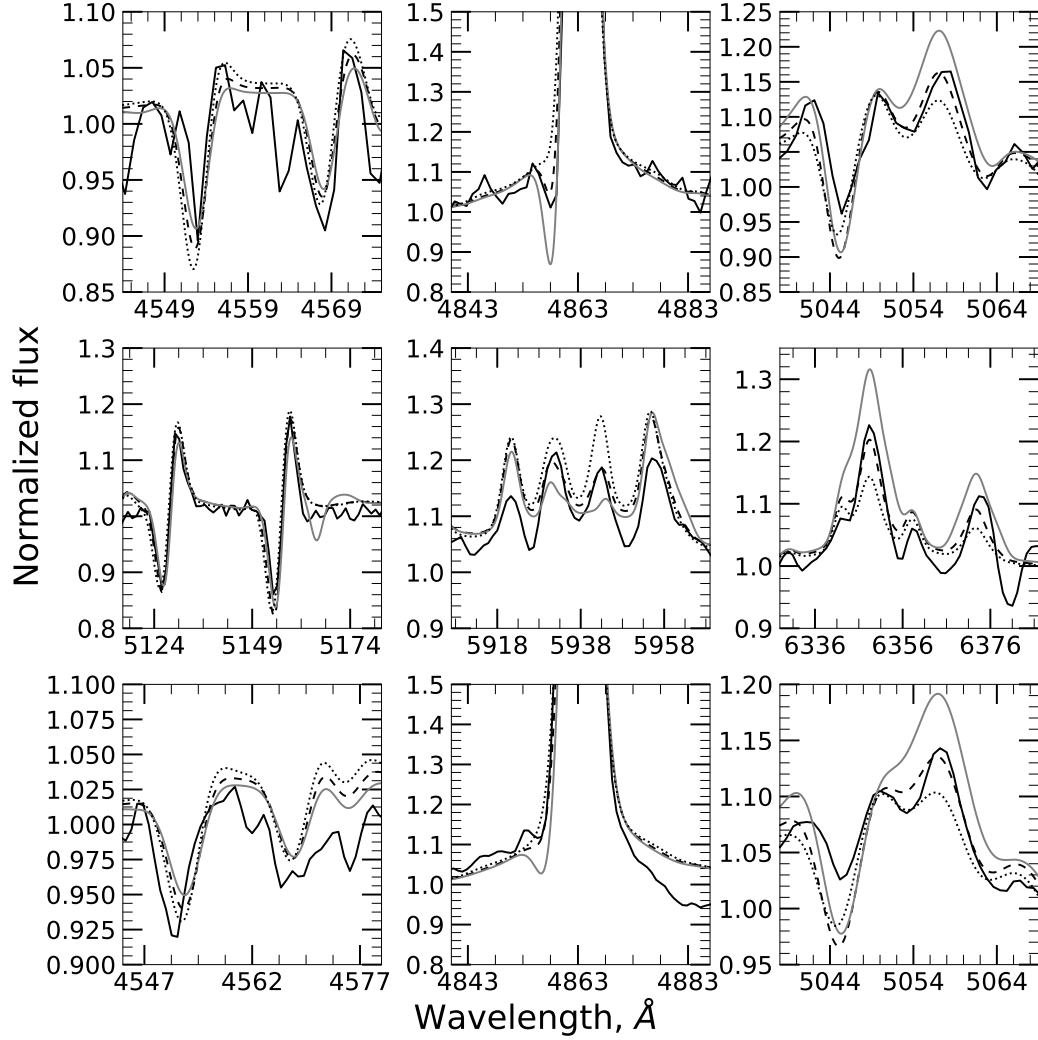


Рисунок 14 — Модельный спектр MN112, сглаженный со спектральным разрешением $3.4 \text{ \AA}$ (верх, середина) и $5 \text{ \AA}$ (низ) при разных температурах. Наблюдаемый спектр MN112 отмечен сплошной черной линией. Наилучшая модель с эффективной температурой $T_{\text{eff}} = 15.2 \text{ кК}$ отмечена штриховой черной линией. Модель с меньшей температурой $T_{\text{eff}} = 14.9 \text{ кК}$ — сплошная серая линия. Модель с большей температурой $T_{\text{eff}} = 15.8 \text{ кК}$ — пунктирная черная линия. Сверху, снизу, слева направо: Si III $\lambda 4554$, $\lambda 4567$; абсорбционный компонент линии H_{β} ; N II $\lambda 5045$, Si II $\lambda 5040$. Середина: Fe III $\lambda 5127$, $\lambda 5156$, Fe II $\lambda 5169$; Si II $\lambda 5916$, $\lambda 5959\text{--}5961$, N II $\lambda 5915\text{--}5960$, Fe III $\lambda 5919\text{--}5964$; Si II $\lambda 6348$, $\lambda 6371$.

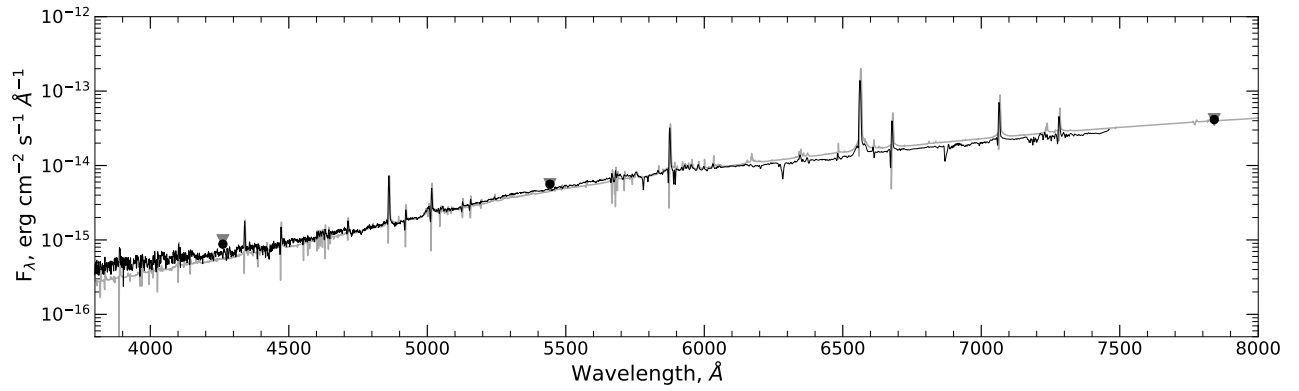


Рисунок 15 — Калиброванный по потокам оптический спектр MN112 (сплошная черная линия) в сравнении с моделью (сплошная серая линия). Звездные величины в фильтрах B, V, I_C для лучшей модели отмечены серыми треугольниками. Черными кругами отмечены фотометрические значения из работы [197]. Ошибки сопоставимы с размерами знаков, которыми были отмечены соответствующие звездные величины.

в работе [212]. Калиброванный по потокам спектр MN112, оптимальная модель и звездные величины в фильтрах представлены на рисунке 15.

С учетом оценки расстояния⁸ до MN112 $\simeq 6.93^{+2.74}_{-1.81}$ кпк, полученной по результатам обзора GAIA DR2 [213], светимость MN112 составляет $L \simeq 5.77^{+2.28}_{-1.50} \times 10^5 L_{\odot}$. Стоит отметить, что значение светимости, представленное выше, также зависит от выбора терминальной скорости ветра.

FWHM линии [N II] $\lambda 5755$ равна $8.19 \pm 0.35 \text{ \AA}$, что соответствует скорости $v = 388 \pm 20 \text{ км с}^{-1}$ с учетом инструментального разрешения $\simeq 3.4 \text{ \AA}$. Эти оценки близки к значению $400 \pm 40 \text{ км с}^{-1}$, полученному в работе [197]. Приняв во внимание факт, что линия [N II] $\lambda 5755$ может формироваться в зоне ускорения ветра, для уточнения оценки скорости ветра было выполнено сравнение несколько моделей с разными терминальными скоростями. Вычисления показывают, что модели со скоростями $300 - 400 \text{ км с}^{-1}$, скорректированные за инструментальное разрешение, имеют хорошее согласие с наблюдаемым спектром в линии [N II] $\lambda 5755$.

В ходе работы были рассчитаны три модели с разными терминальными скоростями $v_{\infty} = 300 \text{ км с}^{-1}$, $v_{\infty} = 325 \text{ км с}^{-1}$ и $v_{\infty} = 388 \text{ км с}^{-1}$. Основные параметры звезды и ветра для этих моделей представлены в таблице 2. На рисунке 16 показано сравнение профилей выбранных линий в спектрах этих моделей. Некоторые параметры (T_* , β , f , v_0) моделей варьировались для сохранения эк-

⁸Для пересчета параметров модели для другого расстояния можно воспользоваться соотношениями из работы [73]

Таблица 2 — Основные звездные параметры наилучших моделей MN112 при разных терминальных скоростях.

	Модель 1	Модель 2	Модель 3
$L_* [L_\odot]$	5.77×10^5	3.60×10^5	3.09×10^5
$R_* [R_\odot]$	49	49	49
$R_{2/3} [R_\odot]$	110	88	88
$T_* [\text{kK}]$	22.8	20.2	19.5
$T_{\text{eff}} [\text{kK}]$	15.2	15.1	14.5
$\dot{M}_{\text{cl}} [M_\odot \text{yr}^{-1}]$	5.74×10^{-5}	3.80×10^{-5}	4.50×10^{-5}
$v_\infty [\text{км с}^{-1}]$	300	325	388
$v_0 [\text{км с}^{-1}]$	1	20	19
$v_{\text{turb}} [\text{км с}^{-1}]$	25	25	25
β	3.4	4.0	6.5
f	0.4	0.35	0.1
$X_{\text{H}} [\%]$	40	40	40
$X_{\text{N}}/X_\odot$	6.8	6.8	6.8
$X_{\text{C}}/X_\odot$	0.1	0.1	0.1
$X_{\text{O}}/X_\odot$	0.1	0.1	0.1
$X_{\text{Si}}/X_\odot$	1.0	1.0	1.0
$X_{\text{Fe}}/X_\odot$	1.0	1.0	1.0

вивалентных ширин и профилей линии H_α одинаковыми во всех моделях.

Далее было выполнено детального исследования скоростного закона ветра на модельный оптический спектр. Модели с меньшими терминальными скоростями требуют более низких значений β для хорошего соответствия FWHM линии H_α наблюдениям, однако, низкие значения β существенно изменяют ионизационную структуру на скоростях $v < v_\infty/2$. Также, в моделях с большими значениями β наблюдаются более сильные крылья линий относительно других моделей с равной интенсивностью в центре линии H_α . Вероятно, это связано с замедленным спадом плотности ветра на низких скоростях и, как следствие, большим рассеянием фотонов. В работе были использованы различные значения фактора заполнения f для описания крыльев линии H_α . В ходе исследования были рассчитаны несколько моделей для каждой терминальной скорости с постоянным наблюдаемым темпом потери массы $\dot{M}_{\text{cl}}$ для оценки факторов заполнения в ветре. Типичные значения f для LBV звезд находятся в диапазоне от 0.1 до 0.5 [50, 214]. Не смотря на то, что в рамках данных моделей предполагается, что неоднородности в ветре возникают начиная со скорости $v_{\text{cl}} = 100 \text{ км с}^{-1}$, изменение фактора заполнения косвенно влияет на плотность

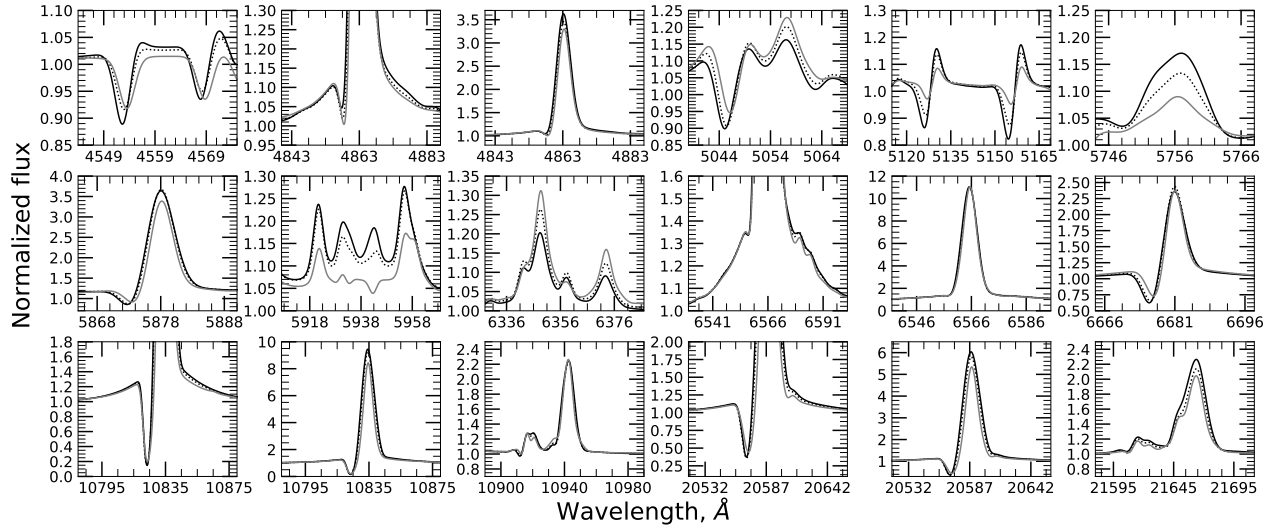


Рисунок 16 — Сравнение выбранных линий в оптическом и ближнем ИК-диапазонах в лучших моделях при разных терминальных скоростях. Модели отмечены сплошной черной ($v_{\infty} = 300 \text{ км с}^{-1}$), пунктирной черной ($v_{\infty} = 325 \text{ км с}^{-1}$) и сплошной серой ($v_{\infty} = 388 \text{ км с}^{-1}$) линиями. Сверху, слева направо: Si III $\lambda 4554$, $\lambda 4567$; абсорбционный компонент линии $\text{H}\beta$; $\text{H}\beta$; N II $\lambda 5045$, Si II $\lambda 5040$; Fe III $\lambda 5127$, $\lambda 5156$; [N II] $\lambda 5755$. Середина: He I $\lambda 5876$; Si II $\lambda 5916$, $\lambda 5959\text{--}5961$, N II $\lambda 5915\text{--}5960$, Fe III $\lambda 5919\text{--}5964$; Si II $\lambda 6348$, $\lambda 6371$; абсорбционный компонент линии $\text{H}\alpha$; $\text{H}\alpha$; He I $\lambda 6678$. Снизу: абсорбционный компонент линии He I $\lambda 10830$; He I $\lambda 10830$; He I $\lambda 10913$, $\lambda 10917$, H I ($\text{Pa}\gamma$) $\lambda 10938$; абсорбционный компонент линии He I $\lambda 20581$; He I $\lambda 20581$; He I $\lambda 21617\text{--}21649$, H I ($\text{Br}\gamma$) $\lambda 21655$.

вещества и, как следствие, ионизационную структуру на низких скоростях ветра $v < 100 \text{ км с}^{-1}$ ввиду изменения нескорректированного темпа потери массы $\dot{M}$ при постоянной величине $\dot{M}_{\text{cl}}$ (необходимо, чтобы темп потери массы с учетом неоднородностей $\dot{M}_{\text{cl}}$ оставался постоянным для сохранения эквивалентных ширин линий водорода и He I неизменными).

На рисунке 16 показана разница в линиях Fe III $\lambda 5127$, $\lambda 5156$, N II $\lambda 5915$ – 5960 и Fe III $\lambda 5919$ – 5964 между моделями с разными терминальными скоростями. Модель с терминальной скоростью $v_{\infty} = 388 \text{ км с}^{-1}$ требует повышения температуры для достижения хорошего соответствия с наблюдаемым спектром в линиях N II и Fe III. В этом случае, темп потери массы должен быть увеличен для сохранения ионизационного состояния постоянным в отдаленных частях ветра, в том числе для усиления абсорбционного компонента линий Бальмеровской серии. Однако, при больших темпах потери массы эквивалентные ширины линий H_{α} и Si II становятся слишком большими и плохо согласуются с наблюдательными данными. Модель с терминальной скоростью $v_{\infty} = 300 \text{ км с}^{-1}$ наилучшим образом соответствует наблюдаемому спектру во всех частях ветра (в линиях водорода, Si III/Si II, Fe III).

На рисунке 17 представлены выбранные линии наилучших моделей при различных фотосферных скоростях. Температура на гидростатическом радиусе T_* была скорректирована для сохранения неизменной ионизационной структуры ветра среди выбранных моделей атмосфер. Эквивалентная ширина линий в ближнем ИК-диапазоне значительно увеличивается при $v_0 \gtrsim 15 \text{ км с}^{-1}$ и $v_0 \gtrsim 30 \text{ км с}^{-1}$ для моделей с терминальными скоростями $v_{\infty} = 300 \text{ км с}^{-1}$ и $v_{\infty} = 325 \text{ км с}^{-1}$, соответственно. Полученные оценки фотосферных скоростей находятся в диапазоне $1 - 15 \text{ км с}^{-1}$ для $v_{\infty} = 300 \text{ км с}^{-1}$ и $20 \pm 5 \text{ км с}^{-1}$ для $v_{\infty} = 325 \text{ км с}^{-1}$.

Турбулентная скорость $v_{\text{turb}} = 25 \text{ км с}^{-1}$ была определена по смещению наиболее сильных линий водорода и He I в моделях относительно наблюдаемого спектра MN112. Линии Бальмеровской серии оказались смещенными в красную сторону относительно наблюдаемого спектра при турбулентных скоростях превышающих 40 км с^{-1} . Модели с разными турбулентными скоростями и наблюдаемый спектр показаны на рисунке 18. Оценка турбулентной скорости составила $v_{\text{turb}} = 25 \pm 10 \text{ км с}^{-1}$. Также изменение турбулентной скорости в моделях незначительно влияет на силу абсорбционных компонентов линий водорода

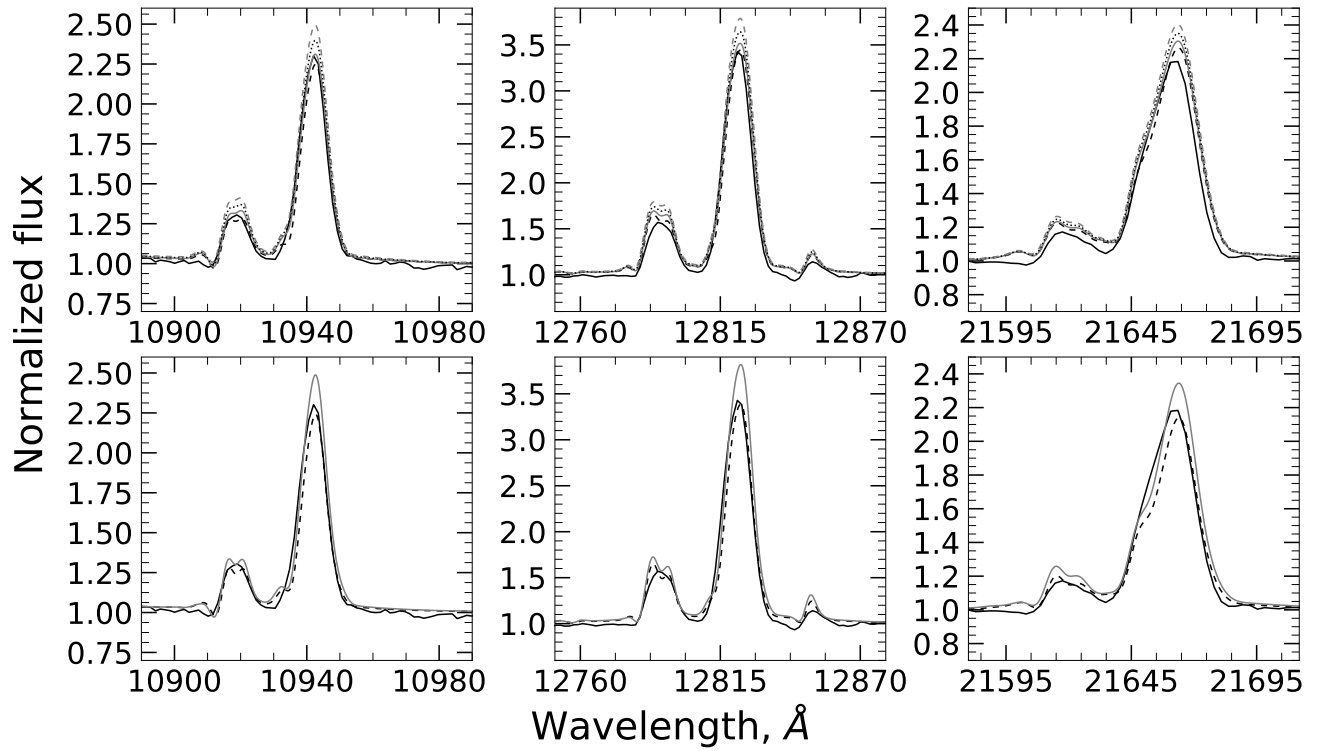


Рисунок 17 — Наилучшие модели MN112 с одинаковыми эффективными температурами $T_{\text{eff}} = 15.2 \text{ кК}$, но с разными фотосферными скоростями. Наблюдаемый спектр MN112 отмечен сплошной черной линией. Сверху: модели с терминальной скоростью $v_{\infty} = 300 \text{ км с}^{-1}$; модели с разными фотосферными скоростями отмечены штриховой черной ($v_0 = 1 \text{ км с}^{-1}$), сплошной серой ($v_0 = 10 \text{ км с}^{-1}$), пунктирной черной ($v_0 = 15 \text{ км с}^{-1}$) и штриховой серой ($v_0 = 20 \text{ км с}^{-1}$) линиями. Снизу: модели с терминальной скоростью $v_{\infty} = 325 \text{ км с}^{-1}$; модели с разными фотосферными скоростями отмечены штриховой черной ($v_0 = 20 \text{ км с}^{-1}$) и сплошной серой ($v_0 = 30 \text{ км с}^{-1}$) линиями. Сверху и снизу, слева направо: $\lambda 10917$, H I (Pa γ) $\lambda 10938$; He I $\lambda 12783$ -12846, H I (Pa β) $\lambda 12818$; He I $\lambda 21617$ -21649, H I (Br γ) $\lambda 21655$.

Бальмеровской серии и Si III, что увеличивает ошибку измерения температуры.

MN112 и P Cygni обладают близким содержанием основных химических элементов. Содержание гелия в MN112 несколько больше: $\text{He}/\text{H} \simeq 0.37 \pm 0.05$ (по числу атомов) против 0.29 в P Cygni, однако обе звезды обладают идентичным избытком азота ($X_{\text{N}}/X_{\odot} = 6.8 \pm 1.5$), а так же уменьшенным относительно солнечных значений содержанием углерода в составе ($X_{\text{C}}/X_{\odot} < 0.1$ для MN112 и $X_{\text{C}}/X_{\odot} = 0.3$ для P Cygni). Для всех моделей MN112 была использована солнечную металличность ($X_{\text{Si}}/X_{\odot} = 1.0 \pm 0.1$, $X_{\text{Fe}}/X_{\odot} = 1.0 \pm 0.2$).

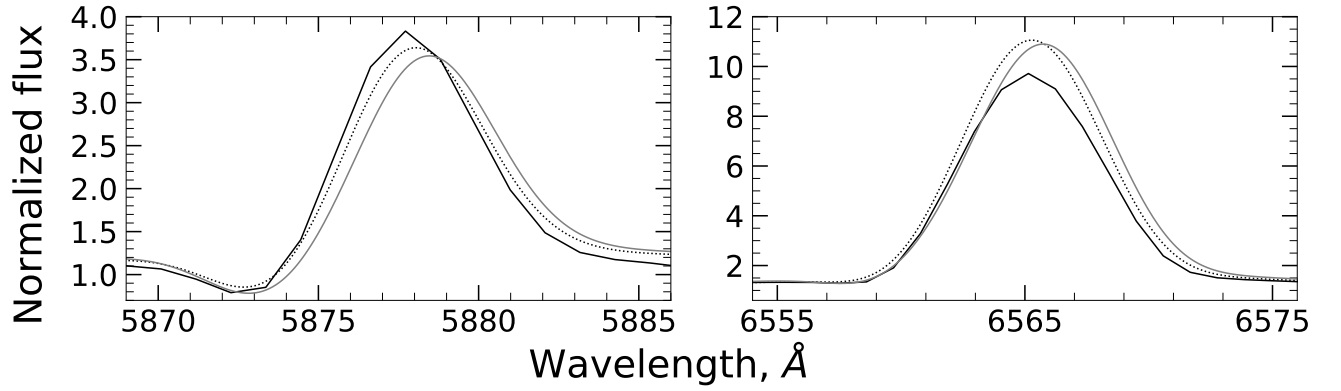


Рисунок 18 — Сравнение лучшей модели ($v_\infty = 300 \text{ км с}^{-1}$) MN112 при турбулентной скорости $v_{\text{turb}} = 25 \text{ км с}^{-1}$ (пунктирная черная линия) и $v_{\text{turb}} = 40 \text{ км с}^{-1}$ (сплошная серая линия). Наблюдаемый спектр MN112 отмечен сплошной черной линией.

2.6 Обсуждение

По результатам моделирования удалось достигнуть хорошей согласованности модельных спектров с наблюдаемыми. Были получены первые оценки фундаментальных звездных параметров cLBV MN112. Доля атомов водорода относительно гелия в атмосфере MN112 несколько меньше ($\text{He}/\text{H} \simeq 0.37$) чем в P Cygni ($\text{He}/\text{H} \simeq 0.29$), в том время как содержание большинства остальных элементов (азота, кремния и железа) практически идентично в двух звездах. Линии Бальмеровской серии в спектре MN112 имеют слабые абсорбционные компоненты, также стоит отметить отсутствие линий Fe II в спектре. Было определено, что MN112 имеет более высокую температуру на гидростатическом радиусе $T_* = 22\,800 \text{ К}$, но меньшую эффективную температуру $T_{\text{eff}} = 15\,200 \text{ К}$, чем P Cygni. Большая разница между T_* и T_{eff} указывает на наличие у MN112 очень протяженной фотосферы, формируемой ветром ($R_{\tau=2/3}/R_* \approx 2$).

Относительная сила крыльев линий Бальмеровской серии в спектре MN112 (фактор заполнения $f = 0.1 - 0.4$) меньше чем в спектре P Cygni ($f = 0.5$). Светимость наилучшей модели MN112 $L = 5.77 \times 10^5 L_\odot$ близка к светимости P Cygni. Были получены оценки темпа потери массы $\dot{M} = 3.63 \times 10^{-5} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ ($\dot{M}_{\text{cl}} = 5.74 \times 10^{-5} M_\odot \text{ yr}^{-1}$), скоростного закона ветра $\beta = 3.4$, а также фотосферной $v_0 = 1 \text{ км с}^{-1}$ и терминальной $v_\infty = 300 \text{ км с}^{-1}$ скоростей. Сила ветра MN112 $\eta = \dot{M}v_\infty/(L_*/c)$ практически идентична P Cygni ($v_\infty = 185 \text{ км с}^{-1}$). Степень ионизации атмосферы MN112 выше чем у P Cygni, что, вероятно, связано с существенной разницей в распределении микронеоднородностей в ветре.

В случае определения темпа потери массы по рекомбинационным линиям водорода Бальмеровской серии и He I, увеличение фактора заполнения ведет к уменьшению плотности ветра на низких скоростях $v < v_{cl}$.

На заключительном этапе работы было выполнено сравнение оптического спектра MN112 со спектрам подтвержденных LBVs, LBV-кандидатов и Of/late-WN звезд, представленных в работе [151]. Всего было выделили три LBV-звезды с близким к MN112 оптическим спектром: AF And в M31 и Var B, Var 2 в M33. В спектрах этих звезд не наблюдаются линии Fe II и [Fe II]. Они идентичны спектрам Of/late-WN звезд. Как показано в работе [118], LBVs имеют меньшие скорости, измеренные по линиям водорода $v = 229 \text{ км с}^{-1}$ и гелия He I $v = 221 \text{ км с}^{-1}$, относительно значений $v = 329 \text{ км с}^{-1}$ и $v = 313 \text{ км с}^{-1}$, полученных для Of/late-WN звезд. Аналогичные оценки скорости для MN112 равны $v = 263 \text{ км с}^{-1}$ и $v = 187 \text{ км с}^{-1}$ для линий водорода и He I, соответственно. Эти значения близки к оценкам, полученным для LBV-звезд. Однако, при этом MN112 обладает достаточно большой терминальной скоростью ветра $v_{\infty} = 300 - 400 \text{ км с}^{-1}$ в совокупности с протяженной зоной ускорения ветра ($\beta = 3.4 - 6.5$).

Эффективная температура и терминальная скорость MN112 ниже, чем у немного более горячих LBV-кандидатов из класса Of/late-WN звезд, в то время как темп потери массы существенно выше, чем у близких по температуре В-звезд. Наличие спектральной переменности на малых промежутках времени могло бы подтвердить LBV статус MN112. Спектр MN112 из этой работы был сравнен со спектром, полученным в 2015 году на 6-метровом телескопе БТА. К сожалению, недостаточное спектральное разрешение ($\sim 5 \text{ \AA}$) не позволяет достоверно оценить изменения в спектре. Для уточнения статуса MN112 необходимы дальнейшие исследования.

2.7 Выводы главы 2

В главе 2 представлены результаты не-ЛТР моделирования оптического и инфракрасного спектров LBV-кандидата MN112. Наилучшее соответствие модели и наблюдаемых спектров было найдено при светимости $L = 5.77 \times 10^5 L_{\odot}$, эффективной температуре $T_{\text{eff}} = 15200 \text{ К}$ и темпе потери массы $\dot{M} = 3.63 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ($\dot{M}_{cl} = 5.74 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$). Химический состав вещества в ветре MN112 оказался близок к ее прототипу P Cygni при несколько меньшем со-

держании водорода ($\text{He}/\text{H} \simeq 0.37$ и $\text{He}/\text{H} \simeq 0.29$ у MN112 и P Cygni, соответственно). Было определено, что MN112 имеет более высокую температуру на гидростатическом радиусе $T_* = 22\,800\text{ K}$, но меньшую эффективную температуру $T_{\text{eff}} = 15\,200\text{ K}$, чем P Cygni. Значительная разница между T_* и T_{eff} указывает на наличие у MN112 протяженной фотосферы ($R_{\tau=2/3}/R_* \approx 2$), формируемой плотным ветром с пологим скоростным профилем ($v_\infty = 300\text{ км с}^{-1}$, $v_0 = 1\text{ км с}^{-1}$, $\beta = 3.4$). Отсутствие достоверно определенной переменности не позволяет на текущий момент отнести MN112 к классу LBV.

Глава 3. Оценка фундаментальных параметров звезд и других объектов с мощным оттоком вещества при помощи сеток моделей протяженных атмосфер

Наличие мощного ветра, создаваемого давлением излучения, является характерной чертой большинства классов массивных звёзд. Однако, не только звезды демонстрируют подобные ветры. Спектры с интенсивными и широкими эмиссионными линиями, формируемыми истекающим веществом, также наблюдаются у ультраярких рентгеновских источников (ultraluminous X-ray sources — ULXs). В главе 3 методы, разработанные на примере галактического LBV-кандидата MN112, распространяются на более широкий класс объектов, а также предлагается способ быстрой оценки их параметров.

3.1 Ультраяркие рентгеновские источники

Ультраяркие рентгеновские источники — это яркие точечные внегалактические объекты, находящиеся вне ядер своих родительских галактик, и имеющие светимость более 10^{39} эрг с^{-1} . Последнее десятилетие исследований их рентгеновских и оптических спектров выявило, что подавляющее большинство этих объектов являются черными дырами звездных масс или даже нейтронными звездами, аккрецирующими в сверхэддингтоновском режиме [215]. Фабрика и др. [216] показали, что оптические спектры ULXs подобны спектрам LBVs и WNLh-звезд. Анализируя соотношение между ширинами линий H_α и $\text{He II } \lambda 4686$ в спектрах ULXs, LBVs, WNL-звезд, а также в спектрах двойных систем с черными дырами в нашей Галактики в момент вспышек, авторы пришли к выводу, что эмиссионные спектры ULXs формируются именно в ветрах сверхкритических дисков, которые похожи на ветры звёзд, а не в само-прогреваемых стандартных дисках, которыми обладают двойные системы нашей Галактики. Кроме того, быстрая переменность как эмиссионных линий самих по себе, так и их лучевых скоростей, позволяет также с высокой долей вероятности исключить и звёзды-доноры как возможный источник наблюдаемых эмиссий. Предполагается, что сходство между истечениями ULXs и ветрами звёзд позволяет в первом приближении использовать сферически симметричные модели для

оценки параметров ветров ULXs.

3.2 Методы расчета сеток протяженных атмосфер

Аппроксимация наблюдательных данных синтетическим спектром требует расчета множества моделей и сопряжена с затратой большого количества вычислительного времени. Это побудило нас к созданию сеток моделей, которые позволили бы быстро получать оценки параметров ветра. В данной главе представлены две сетки моделей — одна для LBV-подобных звезд и одна для ULXs, каждая для одного конкретного химического состава, которые покрывают диапазон параметров, типичный для представителей указанных классов. Сетки позволяют оценить температуру фотосферы объекта и темп потери массы в его ветре, используя эквивалентные ширины (EW) определенных линий, измеренные по наблюдаемому спектру. Результаты были протестированы для ряда объектов (LBVs: WS-1, AG Car, P Cyg, Var 15, Var A-1, Галактический LBV-кандидат MN112; Of/late-WN звёзды: M31-004242.33, M31-004334.50, M31-004341.84; ULXs: Holmerg II X-1, NGC 4559 X-7, NGC 5204 X-1, UGC 6456 ULX). Для расчёта моделей использовался код CMFGEN, описание которого представлено в главе 2, раздел 2.3.

Использованные для расчёта сеток параметры приведены в таблице 3. Выбор диапазона значений фундаментальных параметров и химического состава для сетки моделей LBV-звёзд определялся результатами ряда авторов [73, 74, 214, 217], получившими свои оценки на основе детального моделирования наблюдаемых спектров. В модели были включены следующие ионы: H (I), He (I, II), C (I, II, III), N (I, II, III, IV), Si (II, III, IV), Fe (II, III, IV, V, VI, VII), линии которых хорошо видны в спектрах интересующих нас объектов [151, 218]. Уровни нейтральных ионов азота и углерода были включены для более аккуратного расчёта структуры ветра вдали от поверхности звезды. В случае ультраярких рентгеновских источников выбор возможных значений температур и темпов оттока вещества основывался на результатах тестового моделирования наблюдаемых спектров небольшой выборки объектов. Доля водорода была принята равной солнечной, что следует из наблюдаемого соотношения эмиссионных линий He II/He I [216]. Металличность ULXs обычно принимается равной металличности родительской галактики, которая в большинстве случаев ниже солнечной [215]. Для данной работы было выбрано значение 0.2 от солнечного

содержания металлов (таблица 3).

Таблица 3 — Параметры моделей сетки LBV и сетки ULX.

Параметр	Сетка LBV	Сетка ULX
T_* ($\tau_{\text{Ross}} \approx 20$) [K]	$4.08 \leq \log T_* \leq 4.60$ Шаг 0.025	$4.08 \leq \log T_* \leq 4.60$ Шаг 0.025
$\dot{M}$ [$M_\odot$ год $^{-1}$]	$-5.30 \leq \log \dot{M} \leq -3.90$ Шаг 0.10	$-6.35 \leq \log \dot{M} \leq -4.50$ Шаг 0.143
$\log L_*$ [$L_\odot$]	5.3	5.0
v_∞ [км с $^{-1}$]	300	300
v_0 [км с $^{-1}$]	30	30
v_{turb} [км с $^{-1}$]	15	15
β	1.0	1.0
f	0.3	0.3
X_{H} [%]	39.7	70.1
$X_{\text{N}}/X_\odot$	10.8	0.2
$X_{\text{C}}/X_\odot$	0.4	0.2
$X_{\text{Si}}/X_\odot$	1.0	0.2
$X_{\text{Fe}}/X_\odot$	1.0	0.2

Рассчитанные сетки представляются в виде диаграмм эквивалентных ширин выбранных линий для моделей с различными темпами потери массы и температурами. Выбирались линии, обладающие наибольшей чувствительностью к параметрам модели в данном диапазоне значений. Фактически, некоторые из фундаментальных параметров можно определить почти независимо, имея в распоряжении данные даже в относительно малом спектральном диапазоне. Температура может быть оценена на основе сравнения эквивалентных ширин линий, относящихся к разным степеням ионизации одного и того же химического элемента. Например, можно использовать эквивалентные ширины линии He II $\lambda 4686$ и линий He I, однако, этот метод не применим к объектам с температурой ниже ≈ 25000 K. Большинство LBVs имеют эффективные температуры ниже 25000 K, в то время как ультраяркие рентгеновские источники демонстрируют более горячие спектры с мощной линией He II $\lambda 4686$. Приняв этот факт во внимание, были рассчитаны модели для диапазона температур 12000–40000 K, который покрывает диапазон температур всех объектов, исследуемых в этой работе.

Для оценки температуры в диапазоне 12000–25000 K могут быть использованы линии Fe II, Si II вместе с водородными линиями Бальмеровской серии.

Относительно высокое содержание ионов Fe II и Si II обусловлено реакциями перезарядки с участием нейтрального водорода и ионов Fe III и Si III. Поскольку соотношение между нейтральным и ионизованным водородом зависит как от температуры, так и от темпа потери массы (доля нейтрального водорода возрастает с ростом плотности ветра), линии ионов Fe II и Si II оказываются очень чувствительны к этим двум параметрам. Для построения диаграмм были выбраны линии Fe II $\lambda 5169$ и Si II $\lambda 6371$. Эти линии формируются в основном во внешних оптически тонких частях ветра, и поэтому абсорбционные компоненты в их профилях незначительны. Это должно снизить потенциальную ошибку измерения эквивалентной ширины, которая может возникнуть ввиду недостаточного разрешения анализируемого спектра.

В спектрах большинства LBV-подобных звезд доминируют линии водорода и гелия. В оптическом диапазоне присутствует множество синглетов (например He I $\lambda 5015$, $\lambda 6678$) и триплетов (например He I $\lambda 4471$, $\lambda 5876$, $\lambda 7065$) линий гелия. Сила синглетов существенно зависит от плотности вещества и, как следствие, распределения скорости ветра. Более низкие скорости вблизи точки перехода от гидростатической области атмосферы к непосредственно ветру (т.н. "sonic point") соответствуют более высоким плотностям. Это делает выбор показателя закона скорости β , а также выбор самого значения скорости v_0 в точке перехода очень важными для корректного моделирования. Однако распределение скоростей вблизи точки перехода не может быть надежно определено на основе только оптических данных без использования дополнительных данных в ИК-диапазоне. Поэтому для решения задачи определения температуры была выбрана линия He I $\lambda 5876$ (вместе с He II $\lambda 4686$), поскольку эквивалентная ширина триплета He I $\lambda 5876$ не сильно чувствительна к структуре скоростей вблизи поверхности звезды.

Сила линий, формирующихся в наиболее глубоких частях атмосферы, сильно зависит и от турбулентной скорости v_{turb} . Поскольку в этих областях скорости направленного и турбулентного движения ещё сопоставимы, существует большая вероятность, что фотон из крыла линии (или даже из континуума) в результате рассеяния перераспределится в её центр. После такого перераспределения фотон может снова поглотиться и излучиться в самой линии, делая её ярче [207]. Этот механизм, в частности, значительно увеличивает эквивалентную ширину линии He II $\lambda 4686$. В то же время, линии, которые формируются

в отдаленных частях атмосферы, где скорости ветра велики, а Томсоновская непрозрачность пренебрежимо мала, могут быть ассиметрично смещены в красную сторону спектра (например, см. главу 2, рисунок 18), поскольку фотон, рассеявшийся в крыло линии в дальнейшем уже не может быть снова поглощен, и беспрепятственно покидает среду, в то время как фотоны голубого крыла линии могут поглотиться и рассеяться ещё раз [207]. Поэтому значительное отличие оценок температур, получаемых из разных диаграмм, может говорить о существенном вкладе рассеяния в интенсивность некоторых линий (раздел 3.4, результаты для звезды WS-1).

Для своих моделей были выбраны значения $v_0 = 30 \text{ км с}^{-1}$ и $v_{\text{turb}} = 15 \text{ км с}^{-1}$. Подобные значения использовались и другими авторами при моделировании спектров LBV-звезд [74, 209].

Темпы потери массы можно оценить по эквивалентным ширинам линий водорода Бальмеровской серии, учитывая при этом значения температур, полученные методами описанными выше. У объектов с температурами $T_{\text{eff}} \lesssim 20000 \text{ К}$ сила абсорбционных компонент линии Бальмеровской серии определяется ионизационным состоянием ветра, и даже небольшие вариации температуры и темпа потери массы в ветре могут значительно изменить его ионизационную структуру [73]. Поэтому для определения этих двух параметров можно использовать соотношение между абсорбционными и эмиссионными компонентами бальмеровских линий, но делать это нужно с большой осторожностью, с учетом детального моделирования, поскольку эти линии имеют мощные крылья, вызванные электронным рассеянием, что в случае низкого разрешения спектров очень затрудняет точное измерение эквивалентных ширин абсорбционных и эмиссионных компонент. Как в этом случае следует применять диаграммы эквивалентных ширин, будет рассмотрено в разделе 3.4.

Как и в главе 2, при расчете моделей использовалось выражение 5 для параметризации изменения объемного фактора заполнения и, соответственно, описания распределения оптически тонких неоднородностей вещества в ветре. Величина объемного фактора заполнения во всех моделях была принята равной $f = 0.3$. Чтобы привести полученные темпы истечения вещества в ветре к другому значению f_{new} , следует использовать формулу $\dot{M}_{\text{new}} = \dot{M}_{\text{old}} \sqrt{f_{\text{new}}/0.3}$.

Скорость ветра на бесконечности v_{∞} может быть определена независимо от других параметров путем измерения FWHM запрещенных линий, формирую-

щихся во внешних частях ветра, где ветер движется с уже практически постоянной скоростью (см. главу 2, раздел 2.5). Если эти линии в спектре отсутствуют, скорость на бесконечности может быть определена по голубому смещению абсорбционных компонент линий водорода и He I по отношению к их эмиссионным пикам после учета влияния спектрального разрешения (например, [217]). Однако стоит помнить, что результат, полученный этим методом, может значительно зависеть от выбора показателя β .

Модели каждой сетки рассчитывались для фиксированного значения светимости (таблица 3). Тем не менее, результаты моделирования могут быть приведены к наблюдаемой светимости при выполнении двух условий, позволяющих оставить неизменными эквивалентные ширины линий водорода и гелия: сохранение величин эффективной температуры и функции плотности ветра $\dot{M}/(v_\infty R_*^{3/2})$ [219]. Используя в качестве начального приближения соотношения $\dot{M} \sim R_*^{3/2}$ и $L \sim R_*^2$, можно получить следующую формулу перехода:

$$\dot{M}_{\text{new}} = \dot{M}_{\text{old}} \sqrt{\frac{f_{\text{new}}}{0.3}} \cdot \frac{v_{\text{new}}}{v_{\text{old}}} \cdot \left(\frac{L_{\text{new}}}{L_{\text{old}}} \right)^{3/4} \quad (6)$$

Однако, в действительности, изменения темпа потери массы, а, следовательно, и плотности ветра, меняют положение границы фотосферы и, соответственно, влияют на эффективную температуру, поэтому приведенная выше формула может оказаться недостаточно точна. Более точные соотношения между параметрами LBV-звезд получены в работе [200].

3.3 Наблюдательные данные

Для проверки сеток моделей были выбраны четыре ULXs и десять LBVs, cLBVs и Of/late-WN звезд, расположенных в галактиках Млечный Путь и M31. Эквивалентные ширины линий трех ULXs (Holmberg II X-1, NGC 5204 X-1 и NGC 4559 X-7) были взяты из работы [216]. Для Галактических LBVs (AG Car, P Cygni, WS-1) и cLBV MN112 были использованы данные из работ [74, 95, 197]. Спектры LBVs Var 15, Var A-1 и Of/late-WN звезд (M31-004242.33, M31-004334.50, M31-004341.84) были взяты с веб-страницы Группы исследования Eta Car Университета Миннесоты⁹ (см. также [218]). Для ультраяркого рент-

⁹<http://etacar.umn.edu/>

геновского источника в галактике UGC 6456, помимо анализа с использованием сеток, было проведено полное моделирование его наблюдаемого спектра, и сравнили полученные результаты между собой. Спектральные наблюдения UGC 6456 ULX проводились на 6-метровом телескопе БТА 7 сентября 2015 года при помощи фокального редуктора SCORPIO [205] в диапазонах 4000-5700 Å и 5700-7500 Å с разрешением 5.3 Å. Редукция данных проводилась стандартным образом в среде MIDAS с использованием контекста LONG.

3.4 Результаты

Спектральное разрешение исходных данных может оказывать существенное влияние на результаты измерений эквивалентных ширин и, соответственно, на получаемые параметры. Самым ярким примером является сглаживание P Cyg профиля линий при плохом разрешении, вплоть до полного его исчезновения (например, см. главу 2, раздел 2.5 и рисунок 13). Это приводит к перераспределению яркости в профиле линии и искажению измеряемых эквивалентных ширин. Аккуратное исправление за аппаратный профиль без детального моделирования зачастую представляется невозможным ввиду того, что первоначальный профиль линии неизвестен и может в действительности оказаться очень сложным (многокомпонентным). Поэтому, для того чтобы сетки могли быть применимы и к спектрам с низким разрешением, были построили дополнительные диаграммы, свернув модельные спектры с профилем Гаусса. На рисунках 19 и 21 приведены диаграммы для оригинального разрешения (без сглаживания), а на рисунках 20 и 22 сглаженные до 5 Å. Сравнение рисунка 19 с рисунком 20 (верхние правые и нижние панели) и рисунка 21 с рисунком 22 показывает, что влияние спектрального разрешения на эквивалентные ширины линий H_α и $He I \lambda 5876$ минимально ввиду слабости абсорбционных компонент этих линий. Более значимый вклад абсорбционных компонент в эквивалентную ширину линий можно увидеть на примере линий H_β и $Fe II \lambda 5169$ (см. верхние левые панели рисунков 19 и 20). Различие в оценках температуры и темпа потери массы, полученных на основе диаграмм $H_\beta - Fe II \lambda 5169$ для высокого и низкого разрешений, составляет $\Delta T_* \approx 500$ K, $\Delta \dot{M} \approx 0.05$ dex для объектов с температурами более 19000 K и $\Delta T_* \approx 2000$ K, $\Delta \dot{M} \approx 0.1-0.2$ dex для объектов с температурами около 12000 – 16000 K.

Параметры AG Car в горячем состоянии, полученные из диаграммы

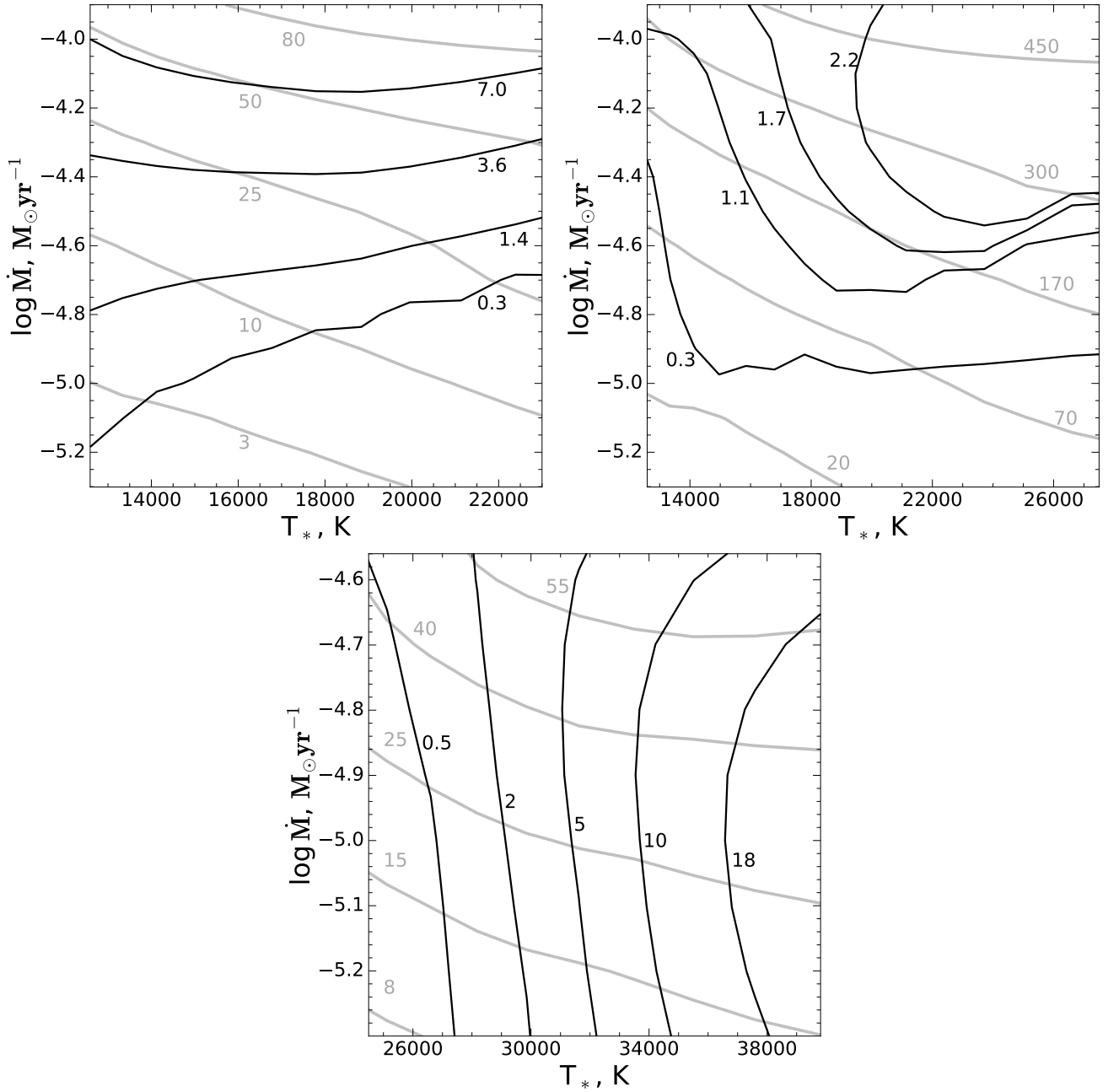


Рисунок 19 — Диаграммы эквивалентных ширин линий моделей LBV-звезд (параметры сетки: светимость $\log L_*/L_\odot = 5.3$, скорость на бесконечности $v_\infty = 300 \text{ км с}^{-1}$, объемный фактор заполнения $f = 0.3$, солнечная металличность) для спектров высокого разрешения; левая верхняя панель: $\text{H}\beta$ (серые линии) и $\text{Fe II } \lambda 5169$ (черные линии); правая верхняя панель: $\text{H}\alpha$ (серые линии) и $\text{Si II } \lambda 6371$ (черные линии); нижняя панель: $\text{He I } \lambda 5876$ (серые линии) and $\text{He II } \lambda 4686$ (черные линии).

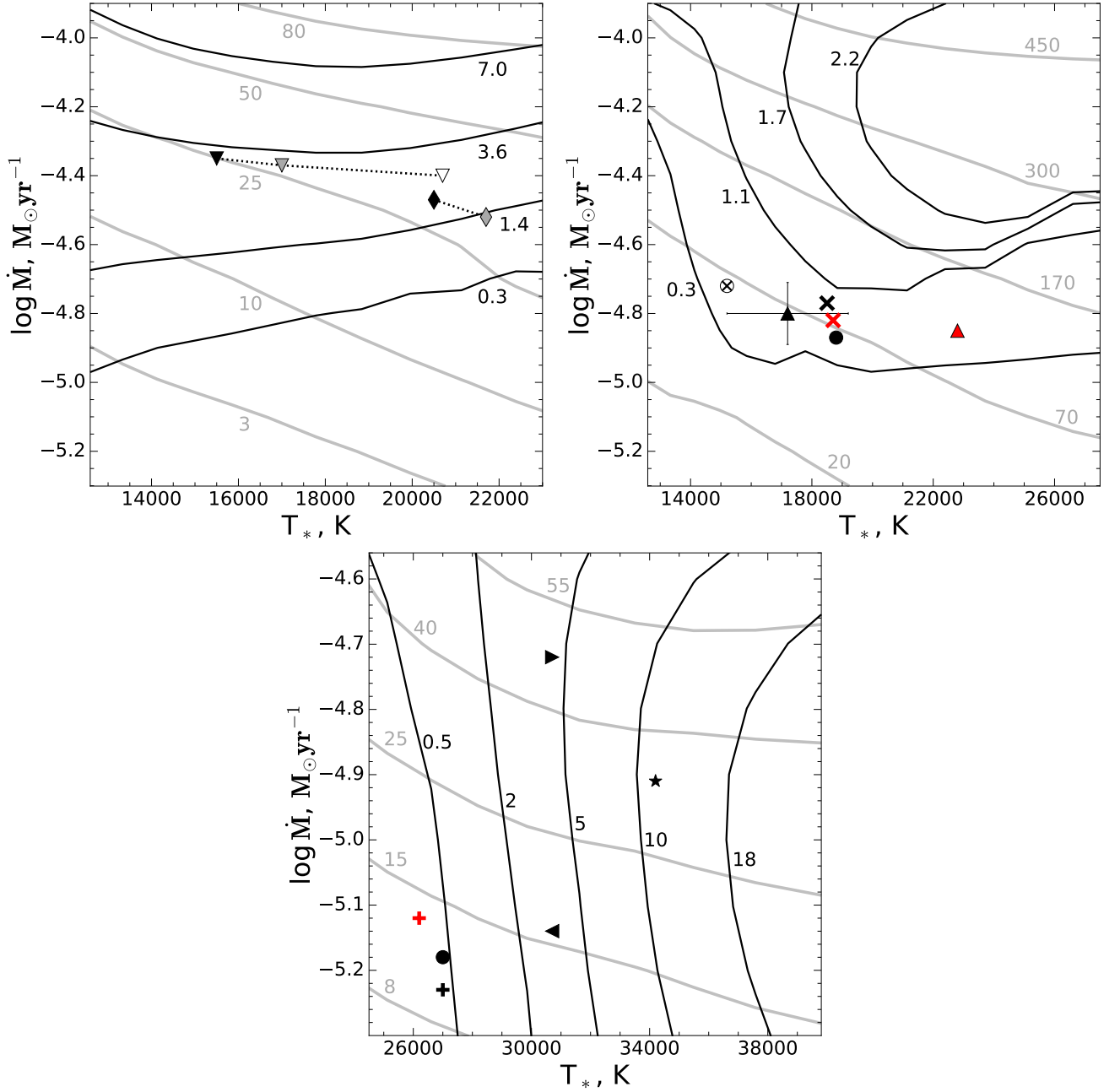


Рисунок 20 — Диаграммы эквивалентных ширин; обозначения те же, что и на Рис. 19, но спектральное разрешение модельных спектров соответствует $5 \text{ \AA}$. Положения звёзд на диаграмме обозначены следующими символами: WS-1 — кружок, AG Car — плюс, P Cygni — крест, MN112 — треугольник, повернутый вершиной вверх, Var A-1 — треугольники с вершиной вниз, Var 15 — ромбы, M31-004242.33 — треугольник с вершиной направо, M31-004334.50 — звезда, M31-004341.84 — треугольник с вершиной налево. Переходы между различными состояниями звёзд Var A-1 и Var 15 показаны символами разного цвета (черный, серый и белый). Альтернативное положение звезды WS-1 из-за повторного пересечения контуров на диаграмме $H_\alpha - \text{Si II } \lambda 6371$ (см. текст) показано перечёркнутым кружком. Красными символами обозначены положения звёзд, соответствующие параметрам, полученным в результате детального моделирования.

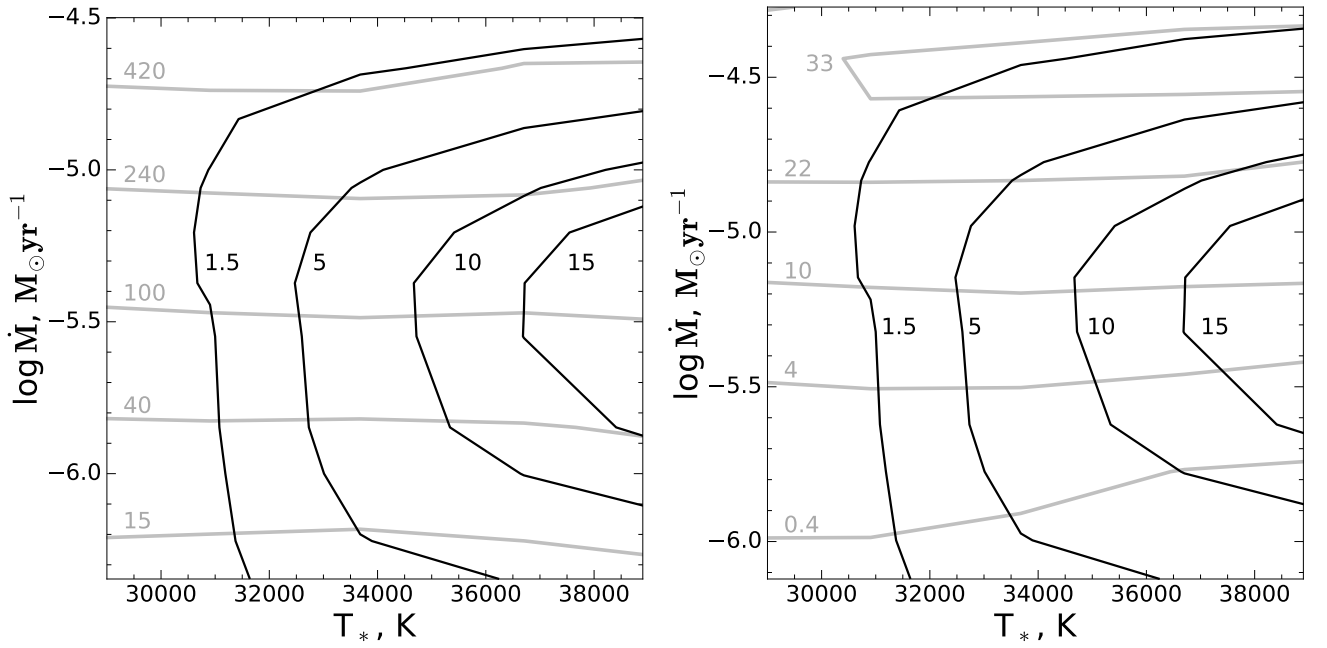


Рисунок 21 — Диаграммы эквивалентных ширин линий моделей ультраярких рентгеновских источников (параметры сетки: светимость $\log L_*/L_\odot = 5.0$, скорость на бесконечности $v_\infty = 300 \text{ км с}^{-1}$, объемный фактор заполнения $f = 0.3$, металличность, равная 0.2 от солнечного значения) для спектров высокого разрешения; левая панель: $\text{H}\alpha$ (серые линии) и $\text{He II } \lambda 4686$ (черные линии); правая панель: $\text{He I } \lambda 5876$ (серые линии) и $\text{He II } \lambda 4686$ (черные линии).

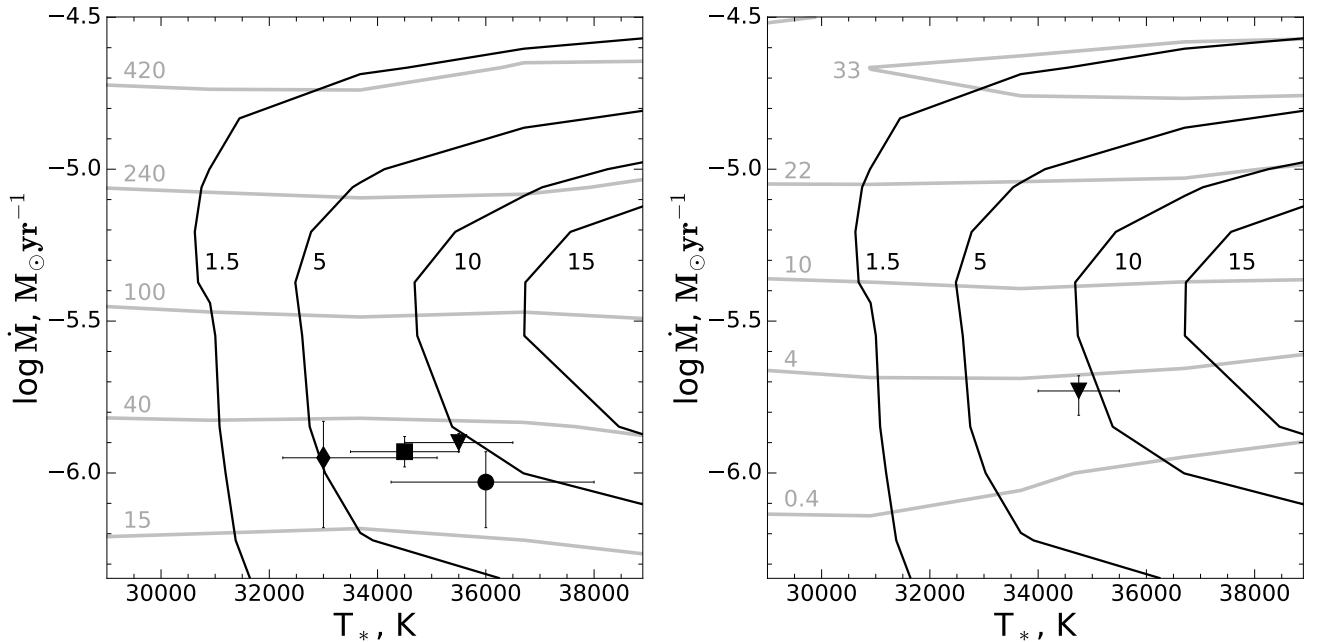


Рисунок 22 — Диаграммы эквивалентных ширин; обозначения те же, что на Рис. 21, но для спектрального разрешения 5 Å . Кружком обозначено положение Holmberg II X-1, квадратом — NGC 5204 X-1, треугольником — NGC 4559 X-7, ромбом — UGC 6456 ULX.

He II $\lambda 4686 - \text{H}_\alpha$, были сопоставлены с результатами детального моделирования. Полученные оценки $T_* \approx 27000 \text{ K}$ и $\dot{M}_{\text{cl}} \approx 4.9 \times 10^{-5} M_\odot \text{yr}^{-1}$ хорошо согласуются с параметрами $T_* = 26200 \text{ K}$ и $\dot{M}_{\text{cl}} = 6.3 \times 10^{-5} M_\odot \text{yr}^{-1}$ ($\log L_* = 6.17$, $v_\infty = 300 \text{ km s}^{-1}$, $f = 0.1$), представленными в работе [74]. Некоторое расхождение в темпах потери массы в моделях может наблюдаться вследствие отличий в параметризации распределения плотности сгустков вещества по радиусу в моделях, например, скорости, начиная с которой ветер становится неоднородным (см. формулу 7). Выбор параметра v_{cl} существенно влияет на эквивалентные ширины ряда линий и, как следствие, значение темпа потери массы в финальной модели.

Также было выполнено сравнения темпа потери массы и температуры P Cygni, измеренных при помощи диаграммы $\text{H}_\alpha - \text{Si II } \lambda 6371$, с модельными параметрами из работы [220]. Расхождение между оценками на основе сеток $T_* \approx 18500 \text{ K}$, $\dot{M}_{\text{cl}} \approx 4.4 \times 10^{-5} M_\odot \text{yr}^{-1}$ и более точными значениями из детального моделирования $T_* = 18700 \text{ K}$, $\dot{M}_{\text{cl}} = 4.0 \times 10^{-5} M_\odot \text{yr}^{-1}$ составляют всего $\lesssim 2\%$ по температуре и $\approx 9\%$ по темпу потери массы ($\log L_* = 5.79$, $v_\infty = 185 \text{ km s}^{-1}$, $f = 0.5$).

Положения LBV-звезд Var A-1 and Var 15 на диаграмме $\text{H}_\beta - \text{Fe II } \lambda 5169$ (верхняя левая панель Рис. 20) обозначены треугольником и ромбом. Различные цвета соответствуют наблюдениям разных лет: 2010 год — черный, 2013 — серый и 2015 — белый. Из диаграммы видно, что за эти несколько лет Var A-1 перешла в более высокое состояние ионизации. Эквивалентная ширина эмиссионной компоненты H_β звезды Var A-1 поменялась незначительно ($\approx 12\%$), однако уменьшение эквивалентных ширин абсорбционных компонент Fe II и H_β свидетельствует о значительном изменении ионизационной структуры ветра.

В спектре Галактической LBV WS-1 наблюдается линия He II $\lambda 4686$, однако в целом эта звезда показывает более "холодный" спектр с линиями Si II, N II and Fe III, которые соответствуют температурам $T_* < 23000 \text{ K}$ [221]. Оценка температуры, полученная по диаграмме He I $\lambda 5876 - \text{He II } \lambda 4686$, составляет $T_* \approx 27000 \text{ K}$. С другой стороны, диаграмма $\text{H}_\beta - \text{Si II } \lambda 6371$ дает оценки $T_* = 15200 \text{ K}$, $\log \dot{M} = -4.72 M_\odot \text{yr}^{-1}$, либо $T_* = 18800 \text{ K}$, $\log \dot{M} = -4.87 M_\odot \text{yr}^{-1}$ (контуры эквивалентных ширин пересекаются дважды, Рис. 20). Предположительно, ввиду присутствия линий Si II, N II и Fe III значения температуры $T_* \approx 19000 - 22000 \text{ K}$ выглядят более правдоподобно (черный кружок на Рис. 20,

верхняя правая панель); в усилении линии He II $\lambda 4686$, вероятно, большую роль играет электронное рассеяние, что и приводит к завышению температур, получаемых по диаграмме He I $\lambda 5876$ – He II $\lambda 4686$. Этот эффект может быть связан с очень большой протяженностью фотосферы или высокой турбулентной скоростью.

На основе измерений эквивалентных ширин линий, представленных в работе [221], были получены оценки темпа потери массы $\dot{M}_{cl} = 6.4_{-1.1}^{+1.3} \times 10^{-5} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ и температуры $T_* = 17250 \pm 2000 \text{ K}$ Галактического LBV-кандидата MN112. Сравнение с результатами детального моделирования спектра в оптическом и инфракрасном диапазонах, представленного в главе 2, показало хорошую точность оценки темпа потери массы $\approx 10\%$, однако, относительная ошибка определения температуры оказалась заметно больше и составила $\approx 25\%$. Таким образом, полученные оценки темпа потери массы и температуры MN112 согласуются со значениями $\dot{M}$ и T_* , полученными в главе 2, в пределах 1σ - и 3σ -ошибок, соответственно. Как и в случае неопределенности с оценкой температуры WS-1, расхождение в величине T_* для MN112 может быть объяснено наличием протяженной фотосферы, формируемой ветром. Как было показано в главе 2, ветер MN112 показывает достаточно медленный рост скорости $\beta = 3.4$. В то же время, в сетке моделей было использовано стандартное значение $\beta = 1.0$. Подобная разница в характере ускорения приводит к значительным отличиям в плотности вещества в зоне ускорения ветра и, как следствие, существенной разнице в размерах "псевдо-фотосферы".

Голубой и красный спектры UGC 6456 ULX вместе с аппроксимирующей их моделью показаны на рисунке 23. В водородных линиях присутствует небольшой вклад от находящейся рядом с объектом туманности, который невозможно полностью устранить при экстракции спектра. Спектр имеет относительно низкое соотношение сигнал-шум из-за слабой яркости объекта ($m_V \approx 20.3^m$). Болومترическая светимость на расстоянии родительской галактики 4.54 Мпк [222] равна $L \approx 2 \times 10^6 L_{\odot}$ (для поглощения $A_V = 0.2 \pm 0.1$). По результатам детального моделирования скорость на бесконечности была увеличена до 2100 km s^{-1} , показатель степени в скоростном законе β до 1.35. Полученные из моделирования температура и темп истечения равны $T_* = 31250 \text{ K}$ и $\dot{M} = 2.7 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ для фактора заполнения $f = 0.3$, в то время как определенная по сеткам температура оказалась равной $T_* = 33000_{-750}^{+2100} \text{ K}$. Темп по-

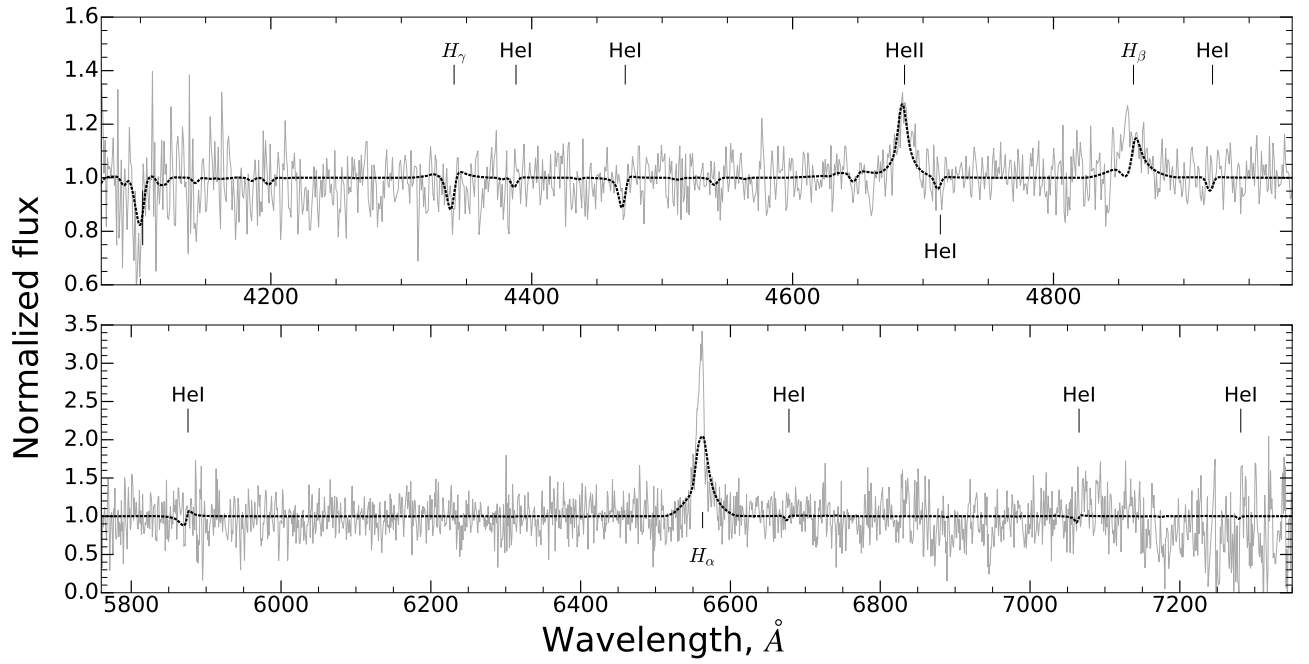


Рисунок 23 — Наблюдаемый спектр ULX в галактике UGC 6456 (сплошная серая линия) и модельный спектр, сглаженный до разрешения $5 \text{ \AA}$ (черная пунктирная линия).

тери массы, полученный из сеток и приведенный к наблюдаемым светимости и скорости ветра с помощью формулы (6), равен $\dot{M} = 7.6_{-3.3}^{+2.0} \times 10^{-5} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ (исходное значение составляло $\dot{M} = 1.2_{-0.5}^{+0.3} \times 10^{-6} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$). Большая величина ошибки темпа потери массы в ветре связана с неопределенностью вклада туманности в эквивалентную ширину линии H_{α} . Таким образом, значения параметров, полученные путем детального моделирования и оцененные из сеток согласуются друг с другом в пределах 3σ -ошибок по температуре T_* и в пределах 2σ -ошибок по темпу истечения $\dot{M}$, хотя и существует большая разница между двумя оценками $\dot{M}$.

Три других ультраярких рентгеновских источника расположены в той же области диаграммы, что и UGC 6456 ULX. Их температуры находятся в диапазоне 34000–36000 K, а темпы потери масс, полученные по He II – H_{α} диаграмме — в диапазоне $(0.9 - 1.3) \times 10^{-6} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$. Для объекта NGC 4559 X-7 дополнительно была использована диаграмма He II–He I $\lambda 5876$ и было получено согласие между полученными двумя способами оценками на уровне 1σ (T_*) и 3σ -ошибок ($\dot{M}$). Чтобы исправить полученные темпы потери массы за наблюдаемые болометрические светимости, для вычисления последних были использованы звёздные величины в фильтре V [223], величины межзвездного поглощения из работ [223] и [224], и температуры из нашего собственного моделирования; грубые оценки

скорости ветра получены по ширинам линии H_α [216]. После коррекции темпы истечения данных ULXs оказались в диапазоне $(1.1 - 2.8) \times 10^{-5} M_\odot \text{yr}^{-1}$.

3.5 Обсуждение

В данной главе диссертации представлены сетки моделей протяженных атмосфер, реализованные в виде диаграмм эквивалентных ширин эмиссионных линий, наблюдаемых в спектрах LBV-подобных звезд и ультраярких рентгеновских источников. Основной идеей их расчета было создание инструмента для простой и быстрой оценки температуры и темпа потери массы в ветрах этих объектов. Было показано, что параметры ветров, измеренные с помощью сеток и полученные на основе детального моделирования, демонстрируют довольно хорошее согласие между собой. По крайней мере для LBV-звезд, как это было показано на примере AG Car и P Cygni, получаемые значения $\dot{M}$ и T_* согласуются с результатами других авторов. Это позволяет рассматривать сетки в качестве хорошей альтернативы сложным и затратным по времени вычислениям в случаях, когда высокая точность не требуется.

В случае Галактического LBV-кандидата MN112 ошибки оценки температуры оказались выше, чем для двух LBVs, упомянутых выше. Вероятно, это связано с наличием у данных звезд протяженной "псевдо-фотосферы", формируемой вследствие более медленного ускорения ветра, чем предполагает стандартная теория звездных ветров. Это указывает на принципиальную важность в определении скоростного закона ветра, однако, для решения этой задачи необходимы дополнительные данные в широком спектральном диапазоне. Так же более детальное исследование динамики ветра возможно в рамках гидродинамических не-ЛТР моделей, расчет которых представляет собой сложную задачу. Подавляющее большинство работ, в которых рассчитывались подобные не-ЛТР модели, учитывающие баланс радиальных сил в ветре, посвящены исследованиям О-звезд [79, 80, 225] или звезд Вольфа-Райе [82, 83, 226]. Поскольку ветры этих объектов значительно отличаются от ветров LBVs, последние остаются недостаточно изученными в данном аспекте.

Для ультраярких рентгеновских источников в настоящее время нет надежных оценок темпов истечения вещества. Имеющиеся оценки ($\sim 10^{-5} - 10^{-4} M_\odot \text{год}^{-1}$) либо основаны на сравнении этих объектов с единственным известным сверхаккретором в нашей Галактике SS433 [216], либо получены

на основе наблюдаемых рентгеновских светимостей ULXs. Оценки температур фотосфер также варьируются в широких пределах (от нескольких десятков тысяч до сотен тысяч Кельвин) в зависимости от начальных предположений [216, 223, 227]. Таким образом, полученные в этой работе значения темпа потери массы и температуры в целом не противоречат предыдущим оценкам.

Наличие мощных истечений газа из ULXs было надежно доказано рентгеновской спектроскопией последних лет. В результате этих исследований были открыты относительно слабые эмиссионные и абсорбционные линии, смещенные в голубую сторону ($\sim 0.2c$), что является прямым свидетельством так называемых ультрабыстрых истечений (ultrafast outflows — UFO, [228, 229]). Для ULXs, оптические спектры которых рассматриваются в этой работе, UFO было достоверно найдено только в случае NGC 5204 X-1; для Holmberg II X-1 сообщается лишь о предварительном обнаружении быстрого истечения [230], а для оставшихся двух ULXs (NGC 4559 X-7 и UGC 6456 ULX) нет работ, посвященных поиску UFO. Скорости быстрых истечений на 1.5-2 порядка величины превосходит скорости обычных ветров, получаемые на основе измерений ширины эмиссионных линий и моделирования оптических спектров ULXs. Такое различие в скоростях может указывать на то, что рентгеновский и оптический спектры формируются в разных областях ветра. Действительно, 2D-RHD расчеты структуры истечения с поверхности сверхкритического диска, проведенные разными авторами, показали неоднородность ветра: вдоль оси вращения формируется канал суб-релятивистского истечения (несколлимированный джет) с температурами газа $T_{\text{gas}} \sim 10^{7.5} - 10^8$ K, тогда как более холодный ($T_{\text{gas}} \sim 10^{6.5}$ K), плотный ($\rho \sim 10^{-6}$ g cm $^{-3}$) и медленный ($< 0.01c$) газ выбрасывается из более дальних областей диска в других направлениях [231].

Также следует отметить, что наличие канала в ветре ULXs нарушает его сферическую симметрию, что в некоторых случаях может сделать модели CMFGEN неприменимыми. Тем не менее, имеющиеся на текущий момент данные не показывают значительного расхождения между наблюдаемыми и модельными спектрами, и, по-видимому, если различие геометрии всё же влияет на форму спектров, то это влияние не существенно.

3.6 Выводы главы 3

В рамках исследования, представленного в главе 3 диссертации, были рассчитаны модельные сетки протяженных атмосфер в диапазоне температур $12000 - 40000$ K и темпов потери массы $\sim 10^{-6} - 10^{-4} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$. Результаты визуализированы в виде диаграмм, отображающих зависимость эквивалентных ширин эмиссионных линий от параметров модели. Их цель – упростить и ускорить определение температуры и темпа потери массы в ветрах данных объектов. Сравнение с результатами, полученными в ходе более детального и сложного моделирования, показало, что параметры ветра, найденные по рассчитанным сеткам моделей, позволяют получить приемлемые оценки параметров ярчайших звезд и других объектов с мощным оттоком вещества, таких как ULXs. Это подтверждает, что сетки являются надежным инструментом для быстрой оценки параметров, когда допустимы некоторые упрощения моделей. Таким образом, разработанные сетки моделей представляют собой эффективную замену трудоемким вычислительным методам для задач, не требующих высокой точности.

Глава 4. Ветер и ближайшее звездное окружение спящей яркой голубой переменной Var 2 в галактике M33

Согласно результатам исследования, представленного в главе 1, распределения проекционных расстояний до ближайших центров ОБ-ассоциаций в галактике M33 для различных выборок звезд хорошо коррелируют с массам рассматриваемых объектов: более массивные звезды вне зависимости от эволюционного статуса в среднем расположены существенно ближе к компактным группам ярких голубых звезд. Однако, некоторые cLBVs, которые в соответствии со своими спектрами были классифицированы как звезды с эмиссионными линиями Fe II [118], оказались значительно изолированы относительно ОБ-ассоциаций. Исследование LBVs/cLBVs с преимущественно низкими температурами $T_{\text{eff}} \approx 10$ кК, найденных в галактиках Местного объема, также показало несоответствие возрастов рассматриваемых LBVs/cLBVs и окружающих их звезд [63–65]. Все это указывает на необходимость одновременного анализа как спектральных особенностей, так и ближайшего звездного населения изучаемых LBVs.

Как было показано в главе 2 и также отмечено в главе 3, выбор скоростного закона является ключевым компонентом в моделировании ветров и оказывает значительное влияние на результаты исследований. В главе 4 диссертации представлено комплексное исследование LBV Var 2 в галактике M33, включающее в себя как продвинутые самосогласованные гидродинамические не-ЛТР модели ветра, позволяющие получить надежные оценки параметров звезды и ее ветра, так и анализ ее звездного окружения.

4.1 Яркая голубая переменная Var 2

Var 2 (V* Y Tri, J013418.35+303836.8) – подтвержденная LBV в галактике M33 [232], переменность которой была открыта около 100 лет назад [233, 234]. Данная LBV достигла максимума блеска $m_{\text{pg}} \approx 16.5$ mag в 1925 году, далее в течение нескольких десятков лет наблюдался спад яркости вплоть до $m_{\text{pg}} \approx 17.5$ mag. Начиная с 1940-ых годов звезда находится в "спящем" состоянии, показывая незначительную фотометрическую переменность [17, 131, 235–239]. Как было упомянуто в главе 2, схожее поведение демонстрирует LBV P Cygni.

На данный момент Var 2 наблюдается как звезда спектрального типа Ofpe/WN9 с низкой терминальной скоростью ветра $v_\infty \approx 230 \text{ км с}^{-1}$ [151], свойственной для LBVs [73, 74]. Примечательно, что хотя видимая звёздная величина $V = 18.17 \text{ mag}$ и показатель цвета $(U - B) = -1.0$, $(B - V) = -0.17$, указанные для Var 2 в работе [237], практически идентичны современным значениям, в работах [236, 237] было отмечено, что Var 2 демонстрирует спектр типа A-F. Эта классификация радикально противоречит наблюдаемому в настоящее время спектру у данного объекта и фотометрическим измерениям, выполненными в течение последних десятилетий. Var 2 располагается примерно в $35''$ от ближайшей большой группы ярких голубых звезд [240, 241], однако неизвестно есть ли связь между ними.

4.2 Наблюдательные данные

4.2.1 Спектральные данные

Спектральные данные были получены 4 декабря 2024 года с помощью спектрографа SCORPIO-1 [205] на 6-м телескопе CAO РАН (БТА). При наблюдениях использовались гризмы VPHG1200B и VPHG1200R, рабочий диапазон которых составляет $3600 - 5400 \text{ Å}$ и $5700 - 7500 \text{ Å}$, соответственно. Ширина щели составляла $0.5''$, что позволило получить спектральное разрешение в обоих диапазонах около 3 Å . Размер изображений звёзд в течение спектроскопии был относительно стабилен и составлял $1.8''$. Обработка спектральных данных выполнялась в среде MIDAS по стандартному алгоритму работы с длиннощелевыми спектрами. Экстракция одномерного спектра производилась с программе SPEXTRA, разработанной для спектров в тесных полях звёзд [242].

Сравнение полученного спектра Var 2 со спектрами, представленными в работах [118, 151]¹⁰, не выявило существенной переменности оптического спектра Var 2 за последнее десятилетие. На рисунке 24 представлена голубая часть оптических спектров, содержащая наибольшее количество диагностических линий. В 2010–2024 годах наблюдались лишь слабые вариации эквивалентных ширин линий He I, He II и водорода.

Вероятно, последние значительные изменения состояния Var 2 произошли в конце XX века. В 1970-х годах звезда демонстрировала холодный спектр,

¹⁰Спектры Var 2 взяты из веб-архива проекта "Eta Carinae and Giant Eruptions" (<https://etacar.umn.edu/>)

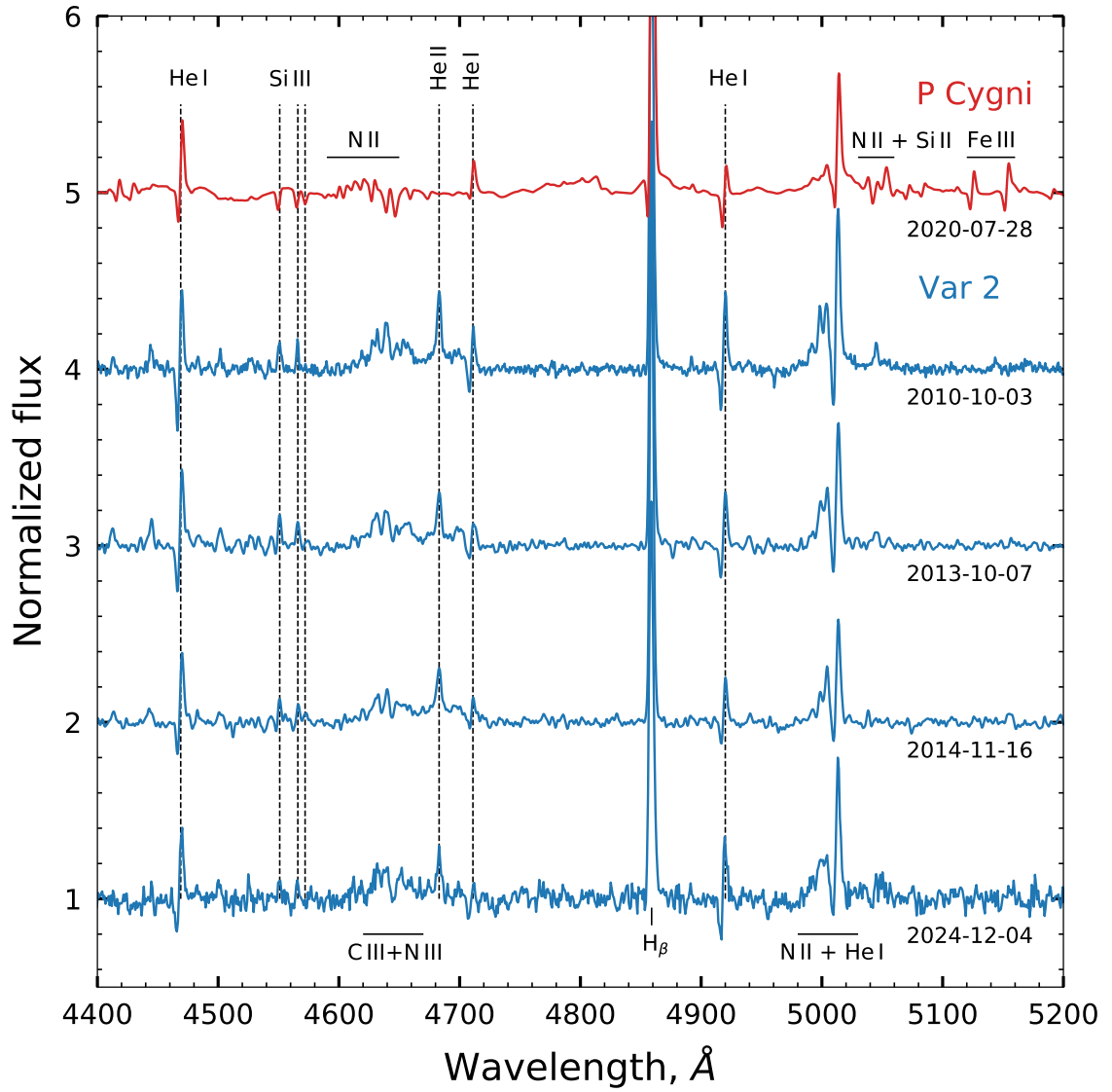


Рисунок 24 — Нормированные оптические спектры Var 2, полученные в разные годы (синии линии), и спектр P Cygni, сглаженный до разрешения $3 \text{ \AA}$ (красная линия). Спектры сдвинуты по вертикали для наглядности.

несмотря на аномально голубые показатели цвета: $(U - B) = -1.0$ и $(B - V) = -0.17$ [236, 237]. К сожалению, спектры Var 2 не снимались с конца 1970-х до начала 2010-х годов, что не позволяет определить точное время перехода от спектра типа A-F к типу WNL. Для объяснения несоответствия типа наблюдаемого спектра и фотометрических измерений, отмеченных в ранних исследованиях Var 2, можно предположить, что протяжённая атмосфера могла существенно исказить наблюдаемые цвета в коротковолновой области спектра из-за обратного Бальмеровского скачка. Действительно, звёзды с плотными истечениями, хотя бы частично сохраняющие нейтральный водород в своих ветрах (например, некоторые LBVs/cLBVs, B[e]-сверхгиганты и жёлтые гипергиганты), имеют по-

казатель цвета ($U - B$), типичный для гораздо более горячих звёзд [17]. В то же время, радикальное изменение спектрального типа звезды, сопровождавшееся кардинальными изменениями свойств ветра, неизбежно отразилось бы на её фотометрии, как это наблюдалось у других LBVs [15, 74, 243, 244]. Однако, это не наблюдалось в случае Var 2, у которой видимая звёздная величина и показатели цвета в голубой части спектра в течение её потенциальной холодной фазы близки к значениям, наблюдаемым в последнее десятилетие. Следовательно, данную аномалию нельзя объяснить наблюдательными свойствами плотных истечений, и она не согласуется с фотометрической переменностью других LBVs.

Спектр Var 2 также был сопоставлен со спектром P Cygni (спектральный класс B1-2 Ia-0ep; [245]), являющегося прототипом "спящих" LBVs. Для этого использовался архивный спектр P Cygni из базы данных SOPHIE¹¹ [246], полученный 28 июля 2020 года. Как видно на рисунке 24, спектр P Cygni значительно холоднее спектра Var 2: в нём отсутствуют линии He II, C III, N III и наблюдается выраженная абсорбционная компонента в профиле линии H β .

4.2.2 Фотометрические данные

Одновременно со спектроскопией были получены также прямые снимки области галактики M33 вблизи Var 2 в фильтрах U, B, V, R_C и I_C . Суммарные времена накопления кадров составили 60 (U), 50 (B), 30 (V), 50 (R_C), 30 (I_C) секунд. Первичная обработка данных и суммирование кадров выполнено в среде MIDAS.

Измерение потоков источника осуществлялось методом апертурной фотометрии в пакете APPHOT в среде IRAF. Фотометрия выполнялась в апертуре радиусом $1.4''$, чтобы уменьшить вклад соседних источников в измеряемый поток (см. ниже). Локальный уровень фона оценивался в кольце с внутренним и внешним радиусами $2.2''$ и $3.6''$. В кружок радиуса $1.4''$ попадает, помимо самой Var 2, три относительно ярких звезды, а также множество слабых источников (см. рисунок 25). Абсолютная калибровка полученных звёздных величин выполнена на основе измерений выбранных опорных звёзд из каталога [17]. Полученные суммарные звёздные величины составили $U_{sum} = 17.37 \pm 0.07$ mag, $B_{sum} = 18.15 \pm 0.04$ mag, $V_{sum} = 18.20 \pm 0.04$ mag, $R_{C,sum} = 18.10 \pm 0.04$ mag и $I_{C,sum} = 17.93 \pm 0.05$ mag.

¹¹<http://atlas.obs-hp.fr/sophie/>

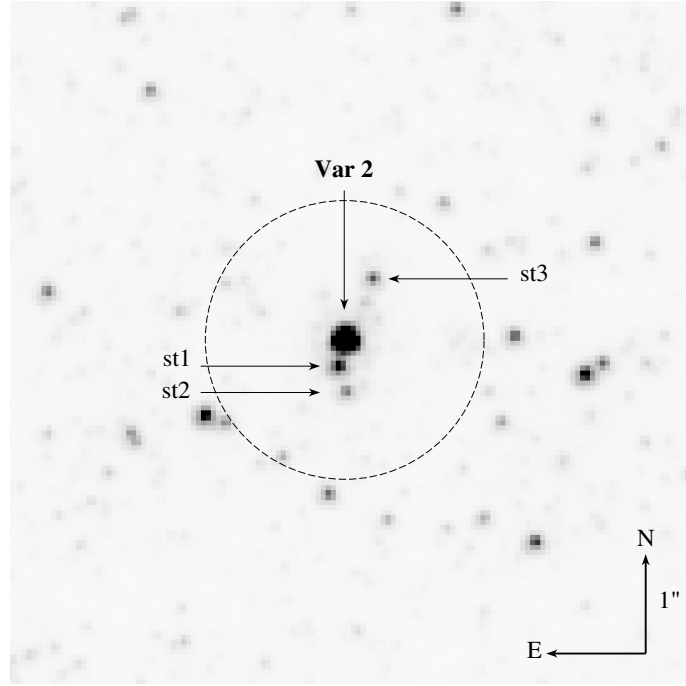


Рисунок 25 — Изображение окрестностей Var 2 в фильтре $F814W$ камеры ACS/WFC HST. Апертура радиусом $1.4''$, использовавшаяся для наземной фотометрии, обозначена пунктирной окружностью. Дополнительно, на изображении отмечены три самых ярких близлежащих источника (st1, st2 и st3), вклад которых в общий поток был учтён.

Наиболее значимый вклад в суммарный поток, помимо Var 2, вносят 3 источника, отмеченных как st1, st2, st3 на рисунке 25. Учёт вклада трёх наиболее ярких звёзд в суммарный поток выполнялся на основе архивных изображений космического телескопа имени Хаббла (HST) в фильтрах $F336W$ (камера WFC3), $F475W$, $F625W$ и $F814W$ (камера ACS/WFC). Измерение их потоков выполнено в программе APPHOT с учётом апертурных поправок, вычисленных на основе таблиц "encircled energy"¹². Полученные звёздные величины были пересчитаны в фильтры U , B , V , R_C , I_C с помощью пакета программ PYSYNPHOT, где в качестве модельных спектров использовались модели звёздных атмосфер [138], которые наилучшим образом описывают наблюдаемые спектральные распределения энергии источников. Итоговые звёздные величины Var 2 составили $U = 17.61 \pm 0.09$ mag, $B = 18.34 \pm 0.05$ mag, $V = 18.40 \pm 0.05$ mag, $R_C = 18.29 \pm 0.05$ mag и $I_C = 18.10 \pm 0.09$ mag. Континуум в полученном оптическом спектре Var 2 был также скорректирован за вклад соседних звезд. Отметим, что влияние остальных источников на поток в заданной апертуре мал и оценивается на уровне ошибок измерения.

¹²Таблицы "encircled energy" представлены на сайте <https://www.stsci.edu/>

Полученные значения видимых звёздных величин согласуются в пределах $0.1-0.2$ mag с результатами многочисленных наземных фотометрических исследований Var 2 в галактике M33, проводившихся на протяжении последних полувека [17, 131, 236–239]. Согласно измерениям программы мониторинга Zwicky Transient Facility (ZTF) [247, 248], среднесрочная переменность Var 2 находится на уровне 0.2 mag, что типично для "спящих" LBVs [37] и некоторых сверхгигантов [249]. Таким образом, можно заключить, что Var 2 не проявляет значительной переменности на различных временных масштабах.

4.3 Моделирование протяженной атмосферы

Для определения фундаментальных параметров Var 2 по полученным спектральным и фотометрическим данным были использованы сферически-симметричные не-ЛТР модели протяженных атмосфер, рассчитанные при помощи кода CMFGEN [250]. Ввиду высокой сложности подобных вычислений, для упрощения подбора оптимальной модели некоторые параметры моделей были зафиксированы на начальном этапе работы.

Для оценки эффективной температуры $T_{\text{eff}} = 24.4$ kK использовался относительный баланс линий гелия: He II $\lambda 4686$, синглетов He I $\lambda 5015$, He I $\lambda 6678$ и триплетов He I $\lambda 5876$, $\lambda 7065$. Как было отмечено в главе 3, распределение скорости в ветре значительно влияет на интенсивность синглетов нейтрального гелия, в рамках первого этапа данного исследования оптимальная температура была определена для фиксированного скоростного закона, выбранного на начальном этапе работы. Путем варьирования темпа потери массы $\dot{M}$ производился поиск оптимального соответствия между модельными и наблюдаемыми профилями наиболее интенсивных линий водорода Бальмеровской серии. Модельный спектр оказался наиболее близок к наблюдениям при $\dot{M} = 2.1 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$. Светимость $L_* = 6.5 \times 10^5 L_{\odot}$ была определена при помощи аппроксимации фотометрических данных, представленных в разделе 4.2, с учетом расстояния $d = 920$ кпк до галактики M33 [167] и с использованием кривых поглощения из работы [251]. Покраснение составило $E(B - V) = 0.16 \pm 0.01$, что хорошо согласуется со средним значением $E(B - V) \approx 0.13$ для ОВ-звезд в галактике M33 [17, 252]. Наблюдаемый оптический спектр и синтетический спектр наилучшей базовой модели Var 2 в абсолютных единицах, скорректированный на расстояние и межзвёздное покраснение, вместе с фотометрическими данными

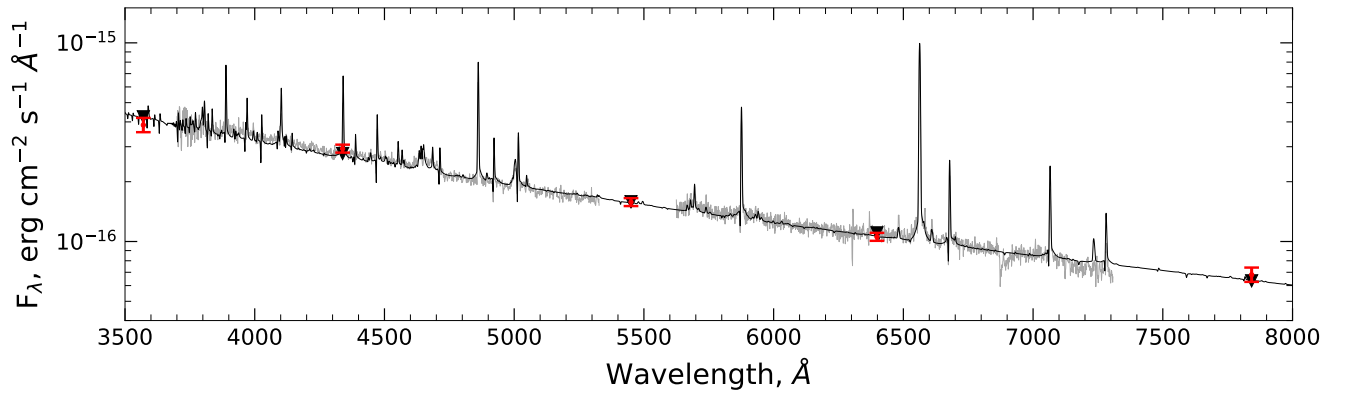


Рисунок 26 — Наблюдаемый оптический спектр (серая линия) и синтетический спектр наилучшей базовой модели (черная линия) Var 2 в абсолютных единицах. Наблюдаемая и модельная фотометрия показаны красными столбцами и черными треугольниками, соответственно.

представлены на рисунке 26.

Изменение скорости ветра с радиусом было описано при помощи изотермальной шкалы высоты вблизи поверхности звезды, переходящей в простой экспоненциальный β -закон в верхних слоях атмосферы (см. главу 2, раздел 2.3 и выражение 4).

Значение v_{core} выбиралось таким, чтобы оптическая глубина на гидростатическом радиусе R_* оставалась в пределах $50 \leq \tau_{\text{Ross}} \leq 200$. Величина $v_0 = 20 \text{ км с}^{-1}$ соответствовала скорости звука $v_{\text{sonic}} \approx 18 \text{ км с}^{-1}$ вблизи транзитной зоны ветра. Выбор оптимального значения $h_{\text{eff}} = 0.1 R_*$ основывался на соотношении между давлением газа и излучения к гравитации во внутренних частях ветра, однако, отметим, что точное описание гидростатической структуры атмосферы в рамках используемого приближения невозможно.

Результаты многочисленных исследований LBVs не позволяют сделать однозначных выводов о динамических свойствах их ветра. Так, при моделировании протяженных атмосфер LBVs одинаково успешно применялись различные показатели степени $\beta \sim 1 - 3$ в рамках аналитического описания распределения скорости вещества с радиусом [37, 74, 77, 194]. Результаты радиационно-гидродинамических расчетов ветра подобных звезд также значительно отличаются друг от друга [81, 253]. Для уменьшения количества свободных параметров моделей в качестве начального приближения модели ветра Var 2 был выбран стандартный показатель степени $\beta = 1.0$, типичный для ветров наиболее горячих голубых звезд [80, 254, 255].

Согласно измерениям скоростей абсорбционных компонент P Cyg профилей

линий водорода Бальмеровской серии и He I терминальная скорость ветра Var 2 составляет $v_\infty \approx 230 \text{ км с}^{-1}$ [151]. Однако, ширины эмиссионных компонент линий в моделях при данном значении скорости оказались заметно переоценены относительно наблюдений. Как показали результаты моделирования, при несколько меньшей величине терминальной скорости $v_\infty = 210 \text{ км с}^{-1}$ общий вид рассчитанных профилей линий более приближен к наблюдаемым.

Наблюдения в широком диапазоне длин волн косвенно указывают на значительную неоднородность вещества в ветрах горячих массивных звезд [256–258]. В рассчитанных моделях ветра учитывалось наличие оптически прозрачных сгустков вещества, разделенных пустым пространством (см. главу 2, раздел 2.3). Данный подход предполагает корректировку плотности газа при помощи объемного фактора заполнения f , определяемого как соотношение между однородной (сглаженной) плотностью вещества к плотности сгустков на данном радиусе. В сравнении с исследованиями, представленным в главах 2 и 3, при моделировании протяженной атмосферы Var 2 была использована более сложная форма параметризации распределения величины $f(r)$ в ветре [77]:

$$f(r) = f_1 + (1 - f_1) \exp\left(\frac{-v(r)}{f_2}\right) + (1 - f_1) \exp\left(\frac{v(r) - v_\infty}{f_3}\right) \quad (7)$$

где f_1 является максимальным достигаемым значением объемного фактора заполнения, а f_2 и f_3 определяют скорости, при которых степень неоднородности ветра растет и падает, соответственно. Подобное распределение хорошо согласуется с наблюдениями [76, 78] и теоретическими моделями звездных ветров [259, 260].

Величина f_1 определяется при сравнении интенсивностей эмиссионных линий, зависящих от плотности линейно (резонансные линии в ультрафиолете) и квадратично (рекомбинационные линии в оптическом или инфракрасном диапазоне) [261, 262]. Степень неоднородности ветра также может быть оценена по относительной интенсивности крыльев электронного рассеяния наиболее ярких рекомбинационных линий, например H_α [207]. Обычно значение f_1 для ветров горячих звезд лежит в пределах $f_1 \approx 0.02 - 0.1$ [263–265], однако, при моделировании спектров LBVs/cLBVs в отдельных работах были получены и более высокие значения $f_1 \approx 0.15 - 0.5$ [185, 194, 200]. Предварительные результаты моделирования показали, что наилучшим образом крылья линий водорода Бальмеровской серии и некоторых линий He I в спектре Var 2 описываются при

$$f_1 \approx 0.1.$$

При расчете моделей предполагалось, что неоднородность ветра начинает возрастать при приближении скорости ветра к скорости звука, достигая максимума несколько выше критической точки. Далее, после прохождения плато, соответствующего минимальным значениям f_1 , происходит спад плотности сгустков, и при достижении терминальной скорости v_∞ вещество вновь становится однородным. Таким образом, величина f_2 была принята равной скорости ветра вблизи переходной зоны протяженной атмосферы $f_2 = v_0 = 20 \text{ км с}^{-1}$. Независимое от f_1 и f_2 определение значения f_3 возможно лишь с использованием данных в инфракрасном и радио диапазонах [76–78]. В рассматриваемых моделях протяженных атмосфер предполагалось, что ветер должен становиться наиболее неоднородным при $r \approx 2 R_*$ в соответствии с результатами гидродинамического моделирования ветра прототипа раннего О-сверхгиганта, представленного в [260]. Похожее распределение сгустков вещества в ветре было эмпирически получено для О4 I(n)f звезды $\zeta \text{ Pup}$ [76, 78]. На данном расстоянии ветер в модели ускоряется до $v(r) \approx 0.5 v_\infty$, поэтому для получения минимума f_1 при $r \approx 2 R_*$ величина f_3 была принята равной f_2 . Подобная параметризация распределения неоднородностей также была использована в работе [37] при моделировании протяженной атмосферы несколько более холодного (спектральный класс В1-2 Ia-0ep) Галактического LBV-кандидата MN112.

Гипотеза, что сгустки вещества начинают формироваться глубоко в протяженной атмосфере на околосвуковых скоростях, подтверждается результатами моделирования ветров звезд ранних спектральных классов [266–268]. В то же время, в некоторых случаях требуются существенно большие значения скорости, при которой ветер становится неоднородным для оптимального описания наблюдаемого спектра [194, 210, 211]. Кроме того, при моделировании звездных ветров часто предполагается, что ветер даже во внешних частях остается неоднородным [194, 269, 270] (также см. ссылки выше), при этом используется более простой вид выражения 7 при $f_3 = 0$, что соответствует формуле 5. Так, например, в обеих работах [194] и [37], посвященных исследованию сLBV MN112, было получено хорошее соответствие модельных спектральных линий наблюдаемым профилям в ближнем инфракрасном диапазоне при использовании различных степеней β в скоростном законе и отличающихся распределениях сгустков вещества в ветре.

Для исследования влияния параметризации объемного фактора заполнения f при фиксированном значении $\beta = 1.0$ на полученные модельные спектры, было выполнено сравнение двух базовых моделей с разным распределением неоднородностей в ветре: $f_1 = 0.1$, $f_2 = f_3 = 20 \text{ км с}^{-1}$ (модель А) и $f_1 = 0.5$, $f_2 = 20 \text{ км с}^{-1}$, $f_3 = 0$ (модель В). Величина f_1 в модели В была подобрана таким образом, чтобы крылья электронного рассеяния линий водорода Бальмеровской серии были идентичны модели А. Температура и темп потери массы в модели В также были незначительно скорректированы (в пределах 10%) в соответствии с соотношением эквивалентных ширин линий H I и He I в референсной модели А, остальные параметры ветра остались неизменными.

Как видно на рис. 27, модель А и модель В демонстрируют¹³ схожие профили линий водорода Бальмеровской серии, ионизованного гелия He II $\lambda 4686$ и триплетов нейтрального гелия He I $\lambda 5876$, $\lambda 7065$. В то же время, синглеты He I $\lambda 5017$, $\lambda 6678$ заметно отличаются в представленных моделях: в модели В интенсивность линии He I $\lambda 5017$ значительно слабее, а в профиле линии He I $\lambda 6678$ практически отсутствует абсорбционный компонент.

Подобное расхождение в синглетах He I между моделями объясняется резким различием в оптической толщине континуума, формируемого нейтральным гелием He I, связанным с изменением распределения плотности в ветре между моделями. Верхний уровень перехода $5017 \text{ \AA}$ ($1s 2s^1S-1s 3p^1P^o$) и нижний уровень перехода $6678 \text{ \AA}$ ($1s 2p^1P^o-1s 3d^1D$) напрямую населяются с основного состояния резонансными переходами $537 \text{ \AA}$ ($1s^2^1S-1s 3p^1P^o$) и $584 \text{ \AA}$ ($1s^2^1S-1s 2p^1P^o$), соответственно. Эффективная накачка по этим каналам происходит только в модели А с высокой оптической толщиной континуума He I, где достаточная плотность в области формирования континуума поддерживает значительную населённость основного состояния. Снижение плотности в этих областях ветра существенно уменьшает населённость основного состояния, подавляя оба пути накачки и ослабляя спектральные особенности обоих синглетов He I $\lambda 5017$, $\lambda 6678$ в модели В. Кроме того, фотоны, покидающие эти слои протяженной атмосферы, изменяют ионизационное состояние железа во внешних частях ветра, увеличивая относительное количество ионов Fe IV. Это оказывает заметное влияние на поле излучения вблизи резонансной линии He I $\lambda 584$ [271]. Как показано в работе [271], потеря фотонов в линиях Fe IV около $584 \text{ \AA}$ су-

¹³Для наглядного сравнения наблюдаемых и модельных спектров на всех представленных в работе рисунках, рассчитанные спектры были сдвинуты на 170 км с^{-1} в коротковолновую область.

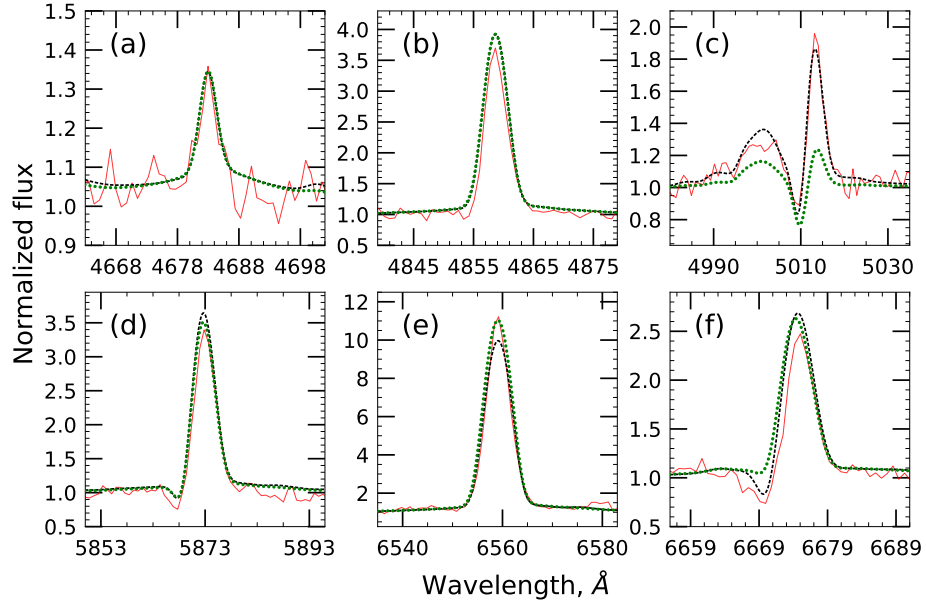


Рисунок 27 — Сравнение формы профиля некоторых спектральных линий в модельных спектрах при различных распределениях неоднородностей в ветре: (a) He II $\lambda 4686$; (b) H_{β} ; (c) N II $\lambda\lambda 4994\text{--}5007$, He I $\lambda 5015$; (d) He I $\lambda 5876$; (e) H_{α} (f) He I $\lambda 6678$. Модель A и модель B (см. текст) обозначены черной штриховой и зеленой пунктирной линиями, соответственно. Красным цветом показан нормированный наблюдаемый спектр Var 2.

щественно изменяет населённость уровня $1s2p\ ^1P^o$, что влияет на профиль и интенсивность связанных с ним линий He I. Как продемонстрировано на рисунке 27, параметризация неоднородностей, использованная в модели A, позволила лучше описать наблюдаемые профили линий He I $\lambda 5017$, $\lambda 6678$ в сравнении с более простой формой распределения f в ветре.

Сильное излучение в важных диагностических линиях, связанное с высокой плотностью ветра, существенно искажает абсорбционный компонент их профилей, что в совокупности с умеренным отношением сигнал-шум и низким разрешением полученного спектра Var 2 не позволяет надёжно и независимо определить скорость вращения звезды и турбулентную скорость в атмосфере. В целом, спектр Var 2 не демонстрирует заметных признаков быстрого вращения звезды, аналогично P Cygni [73], которая считается относительно медленно вращающейся LBV с $v_{\text{rot}}/v_{\text{crit}} \sim 0.2 - 0.3$ [22]. Турбулентная скорость $v_{\text{turb}} = 15 \text{ км с}^{-1}$ была зафиксирована на уровне верхней границы диапазона типичных значений $v_{\text{turb}} = 10 - 15 \text{ км с}^{-1}$, найденных для ранних В [272–274] и поздних О [275, 276] сверхгигантов. Это значение, близкое к скорости звука в переходной области ветра, оказалось несколько более предпочтительным

с точки зрения описания наблюдаемой глубины абсорбционной компоненты в профилях некоторых линий He I по сравнению с меньшими значениями v_{turb} .

Относительное содержание водорода по массе $X_{\text{H}} \approx 43\%$ в протяженной атмосфере Var 2 определялось по соотношению эквивалентных ширин линий водорода Бальмеровской серии и триплетов нейтрального гелия He I $\lambda 5876$, $\lambda 7065$. Доля углерода $X_{\text{C}} = 0.17 X_{\odot}$ и азота $X_{\text{N}} = 1.70 X_{\odot}$ в веществе определялась по линиям C III $\lambda 5696$ и N II $\lambda \lambda 4994\text{--}5010$, соответственно. Для оценки содержания остальных химических элементов использовалось среднее значение металличности $Z \approx 0.5 Z_{\odot}$ в галактике M33 [134]. Ввиду отсутствия ярких выделенных линий кислорода в оптическом спектре, его содержание было принято равным $X_{\text{O}} = 0.03 X_{\odot}$ согласно эволюционным моделям с $Z = 0.006$ [7]. Доля элементов тяжелее кислорода соответствовала металличности $X = 0.5 X_{\odot}$. В модели ветра Var 2 вошли следующие ионы: H I, He I-II, C II-IV, N II-IV, O II-V, Ne II-IV, Mg II-III, Si II-IV, P III-IV, S III-V, Cl IV-VI, Ar III-V, Ca III-VI, Cr III-VI, Mn III-VI, Fe III-VI, Ni III-VI, Co III-VI. Общее количество связано-связанных переходов в рассчитываемых моделях составило примерно $\approx 1.4 \times 10^5$.

Ввиду наличия плотного ветра, скрывающего нижние слои атмосферы, определение массы звезды по диагностике абсорбционных линий затруднено. Оценки возможной массы Var 2 были получены из уравнения энергетического баланса для звездного ветра [277]:

$$\dot{M} \left(\frac{v_{\infty}^2}{2} + \frac{GM_*}{R_*} \right) = \dot{M} \int_{R_*}^{\infty} \left(-\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} + g_{\text{rad}} \right) dr, \quad (8)$$

где g_{rad} – ускорение ветра, создаваемое давлением излучения. Таким образом, для $v_{\infty} = 210 \text{ км с}^{-1}$ оптимальная текущая масса звезды составила $M_* \approx 24 M_{\odot}$.

Финальный спектр в нормированном виде и наилучшая модель продемонстрированы на рисунке 28. По результатам моделирования удалось добиться хорошего соответствия между моделью и наблюдаемыми наиболее яркими линиями водорода Бальмеровской серии, He I, N II и C III. Тем не менее, отдельные особенности спектра в точности воспроизвести не удалось, например, Бальмеровский декремент, глубину абсорбционной компоненты некоторых линий He I или линии кремния Si III/IV. Вероятно, данное расхождение между наблюдениями и моделью может быть связано со сложной структурой распределения неоднородностей в ветре (например, см. соотношение H_{α}/H_{β} на рисунке 27), которые также могут быть оптически толстыми, что в свою очередь может

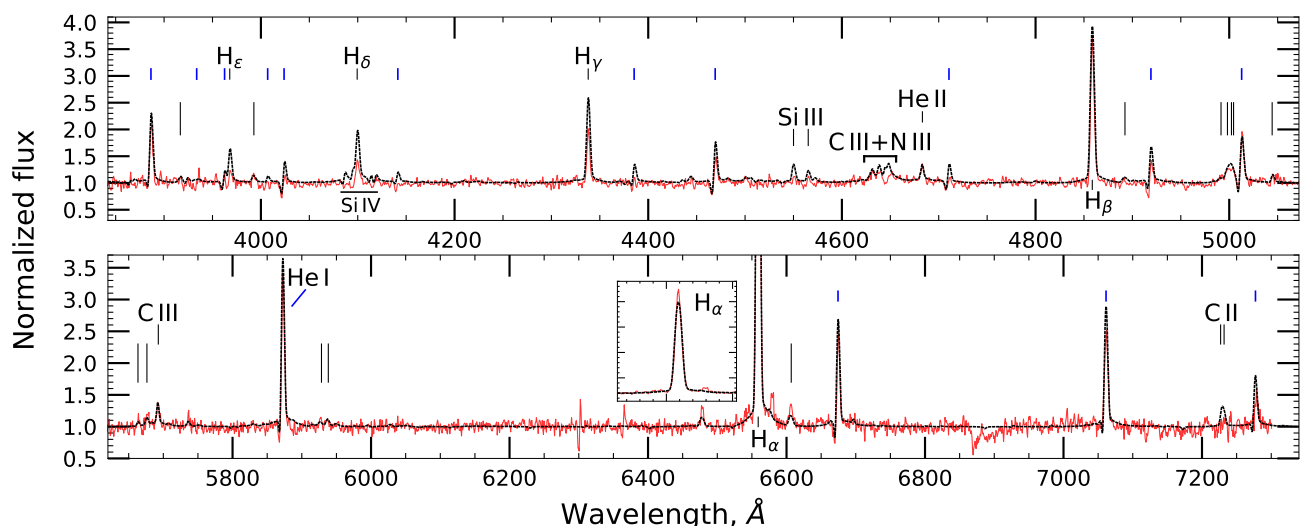


Рисунок 28 — Наблюдаемый спектр Var 2 (красная сплошная линия) и аппроксимирующая его наилучшая базовая модель ветра (черная штриховая линия) в нормированном виде. Линии He I и II обозначены короткими синими и длинными черными штрихами, соответственно.

существенно повлиять на наблюдаемые профили линий [278, 279].

Основные параметры представленной модели протяженной атмосферы Var 2 приведены в таблице 4. Важно отметить, что характеристики полученной модели сильно зависят от принятых предположений относительно некоторых параметров ветра, описанных в этом разделе. Надёжное определение этих параметров, как правило, требует спектральных данных в широком диапазоне длин волн. Например, УФ-спектры необходимы как для определения темпа потери массы независимо от степени неоднородности вещества в ветре, так и для наиболее точных оценок терминальной скорости [1, 74, 280], в то время как ИК-данные важны для определения профиля скорости ветра [194, 209] и распределения относительной плотности сгустков вещества с радиусом [77, 78]. Поскольку спектры Var 2 за пределами оптического диапазона отсутствуют, были использованы ограничения на эти параметры, взятые из исследований других массивных звёзд, сосредоточив внимание на определении темпа потери массы и температуры, оставляя остальные параметры фиксированными. Умеренное отношение сигнал-шум и низкое разрешение нашего спектра не оказывают существенного влияния на определение этих параметров из-за высокой интенсивности и достаточной ширины линий водорода и гелия в оптическом диапазоне.

Таблица 4 — Основные параметры двух моделей протяженный атмосферы Var 2: модель с аналитическим профилем скорости ветра и гидродинамическая модель. Остальные характеристики ветра представленной модели подробно обсуждаются в разделе 4.3. $R_{2/3}$ и T_{eff} — радиус и температура на оптической глубине $\tau_{\text{Ross}} = 2/3$, T_* — температура на гидростатическом радиусе R_* ($\tau_{\text{Ross}} \approx 150$).

Параметр	Базовая модель	Гидродинамическая модель
L_* , [$L_\odot$]	6.5×10^5	6.5×10^5
M_* , [$M_\odot$]	24	23
$\dot{M}$, [$M_\odot \text{ yr}^{-1}$]	2.1×10^{-5}	2.1×10^{-5}
T_{eff} , [kK]	24.4	24.8
$R_{2/3}$, [$R_\odot$]	45.0	43.7
T_* , [kK]	34.2	32.3
R_* , [$R_\odot$]	23.0	25.7
β	1.0	—
v_∞ , [km s^{-1}]	210	230
f_1	0.1	0.1
v_{turb} , [km s^{-1}]	15	15
X_{H} , [%]	43	43

4.4 Динамика ветра

На следующем этапе исследования Var 2 была построена самосогласованная модель ветра, рассчитанная с учетом баланса радиальных сил в протяженной атмосфере звезды. Корректное описание распределения скорости истекаемого вещества позволило более детально исследовать особенности ветра данной LBV и уточнить некоторые параметры моделей.

Уравнение неразрывности для сферически-симметричного ветра имеет вид:

$$\dot{M} = 4\pi r^2 v(r) \rho(r) f(r), \quad (9)$$

а уравнение сохранения момента движения записывается как

$$v \frac{dv}{dr} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} - \frac{GM_*}{r^2} + g_{\text{rad}}. \quad (10)$$

Для расчета динамики ветра предполагалось, что скорость звука в ветре остается постоянной $a = \text{const}$. Как было показано в [79], вклад теплового расширения в ускорение ветра при $v > a$ быстро становится незначительным в сравнении с давлением излучения. По этой же причине для упрощения вычис-

лений при расчёте давления газ считался однородным, однако, отметим, что значимое изменение населенности уровней ввиду повышенного уровня рекомбинаций при более высокой плотности в сгустках вещества и, как следствие, увеличение давления излучения, было учтено в рассчитываемой модели. Комбинируя уравнения 9 и 10, динамику изотермального однородного ветра в случае идеального газа ($P = a^2 \rho$) можно описать уравнением

$$\left(v - \frac{a^2}{v}\right) \frac{dv}{dr} = \frac{2a^2}{r} - \frac{GM_*}{r^2} + g_{\text{rad}} \quad (11)$$

с сингулярностью в критической точке $v(r_c) = a$, градиент скорости в которой определяет характер решений данного уравнения. В случае монотонно ускоряющегося ветра необходимо выполнение условия $\frac{dv}{dr} > 0$ при $v(r) = a$ [281]. Критическая точка r_c может быть найдена из уравнения:

$$2a^2 r_c - GM_* + g_{\text{rad}}(r_c) r_c^2 = 0. \quad (12)$$

Далее, ускорение ветра при $r = r_c$ вычисляется при помощи правила Лопиталя [282]:

$$\left(\frac{dv}{dr}\right)_{r_c} = \sqrt{-\frac{a^2}{r_c^2} + \frac{GM_*}{r_c^3} + \frac{1}{2} \left(\frac{dg_{\text{rad}}}{dr}\right)_{r_c}}. \quad (13)$$

Плавный переход между субзвуковой и трансзвуковой зонами ветра предполагает, что

$$\lim_{r \rightarrow r_c^-} v(r) = \lim_{r \rightarrow r_c^+} v(r) \quad (14)$$

и

$$\lim_{r \rightarrow r_c} \frac{dv(r)}{dr} \Big|_{r < r_c} = \lim_{r \rightarrow r_c} \frac{dv(r)}{dr} \Big|_{r > r_c}. \quad (15)$$

Таким образом, полное распределение скорости в ветре звезды может быть найдено при помощи численного интегрирования уравнения 11 вверх и вниз по радиусу от критической точки с использованием значения ускорения полученного при помощи формулы 13. В данной работе решение уравнения 11 проводилось явным методом Рунге-Кутты 5(4) порядка с адаптивным шагом, использующим формулы Дорманда-Принца [283]. Полученная в результате ре-

шения уравнения 11 новая скоростная структура ветра не является согласованной со старым полем излучения, поэтому далее она используется для расчета новой модели атмосферы при помощи кода CMFGEN. Как показали исследования различных групп авторов, оптимальным способом достижения стабильной сходимости подобных итерационных расчетов является коррекция параметров модели на основе баланса сил в критической точке [79, 225].

В отличие от других работ, в данном исследовании варьировалась масса звезды вместо темпа оттока вещества $\dot{M}$ или радиуса критической точки r_c для удобства подбора и сравнения моделей. Новое значение массы звезды на каждом этапе определялось при помощи выражения 12 для фиксированного значения r_c , выбранного на начальном этапе вычислений. Данные итерации повторяются, пока не будет достигнуто условие сходимости [225]:

$$\max \left| 1 - \frac{\left(v^{\text{old}} - \frac{a^2}{v^{\text{old}}} \right) \frac{dv^{\text{old}}}{dr} - \frac{2a^2}{r} + \frac{GM_*^{\text{old}}}{r^2}}{g_{\text{rad}}^{\text{new}}} \right| < 1 \times 10^{-2} \quad (16)$$

при коррекции массы в новой модели относительно значений предыдущего шага также не превышающей 1%. Для стабилизации сходимости применялась половина корректировки скорости в каждой точке ветра при последовательных итерациях. Наиболее отдаленные точки ветра $r \gtrsim 100 r_c$ исключались из расчёта неопределённостей ввиду завышенных численных погрешностей.

Выбор радиуса критической точки r_c в самосогласованных моделях ветра определяет ионизационное состояние вещества в протяженной атмосфере. Исследование синтетических спектров, соответствующих моделям с разными r_c , рассчитанных на основе наилучшей модели протяженной атмосферы Var 2, представленной в разделе 4.3, показало, что наиболее близкий к наблюдениям баланс линий гелия достигается при $r_c \approx 2.4 \times 10^{12}$ см. Это значение хорошо согласуется с радиусом звуковой точки $r_c \approx 2.3 \times 10^{12}$ см в базовой модели. При $r_c \lesssim 2.4 \times 10^{12}$ см железо в веществе представлено преимущественно ионами Fe IV даже в отдаленных частях ветра, что искажает профили синглетов He I (например, см. рисунок 27). В то же время, в моделях с $r_c \gtrsim 2.4 \times 10^{12}$ см линия ионизованного гелия He II $\lambda 4686$ оказалась существенно недооценена относительно наблюдений. Во всех гидродинамических моделях ветра, рассчитанных в рамках данной работы, темп потери массы оставался постоянным и соответствовал значению $\dot{M} = 2.1 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$, полученному в разделе 4.3.

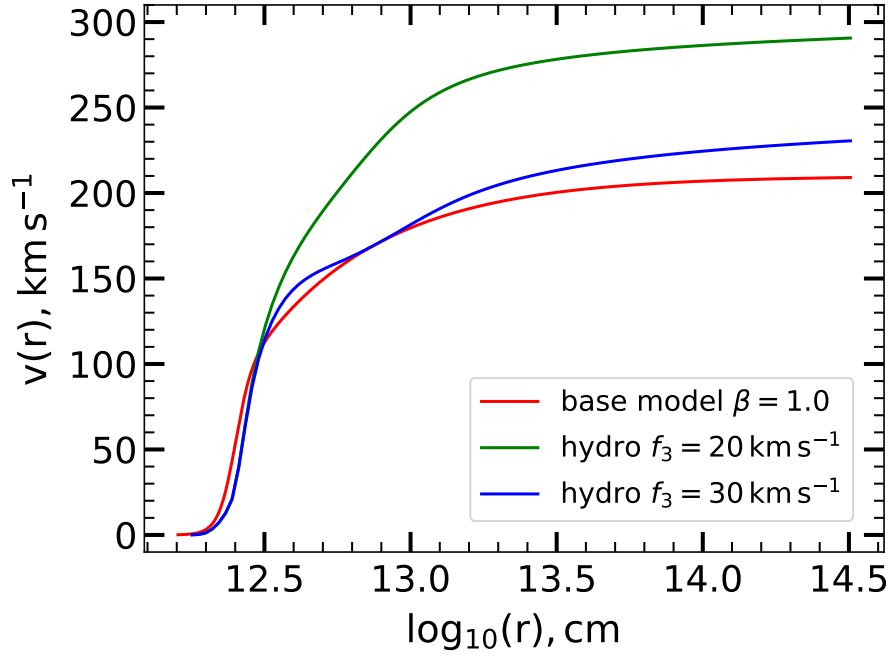


Рисунок 29 — Профили скорости истекаемого вещества для базовой модели протяженной атмосферы Var 2 (красная линия), представленной в разделе 4.3 и рассчитанных на ее основе самосогласованных моделей с различными распределениями неоднородностей в ветре. Нижняя граница атмосферы для самосогласованных моделей соответствует Россенландовой непрозрачности $\tau_{\text{Ross}} \approx 150$ аналогично начальной модели.

Распределение скорости в самосогласованной модели ветра с $r_c = 2.4 \times 10^{12}$ см продемонстрировано на рисунке 29. Терминальная скорость ветра в полученной модели оказалась существенно выше $v_\infty \approx 290 \text{ км с}^{-1}$ базового значения, соответствующего наблюдениям $v_\infty \approx 210 \text{ км с}^{-1}$, при немного меньшем значении массы $M_* \approx 23 M_\odot$ относительно оценки $M_* \approx 24 M_\odot$, полученной в разделе 4.3. Приняв во внимание соотношение $v_{\text{esc}} \propto v_\infty$ [253,284], можно заключить, что данное расхождение в скорости ветра связано не только с разницей в массе звезды в моделях. Для сверки результатов также была вычислена терминальная скорость ветра гидродинамической модели при помощи выражения 8 с использованием переменной скорости звука и модифицированной при помощи объемного фактора заполнения плотности для определения давления газа. Полученное значение $v_\infty \approx 310 \text{ км с}^{-1}$ для массы звезды $M_* = 23 M_\odot$ оказалось близко к терминальной скорости ветра самосогласованной модели, таким образом, разница в полученных скоростях не связана с особенностями алгоритма расчета моделей.

Подобное несоответствие терминальных скоростей может быть объяснено

недооценкой ускорения ветра в начальной модели при использовании аналитического закона с показателем степени $\beta = 1.0$. При переходе к более быстрому росту скорости выше критической точки увеличивается радиативное ускорение за счет оптически толстых линий $g_{\text{rad}}^{\text{thick}} \propto \frac{dv}{dr}/\rho r^2$, что впоследствии и приводит к росту эффективности ускорения ветра.

Дополнительным фактором, влияющим на радиационное ускорение, является зависимость распределения относительной плотности сгустков вещества в ветре от скорости (см. выражение 7). Неоднородность газа усиливает ускорение в спектральных линиях, поскольку способствует более высокому темпу рекомбинаций (ввиду квадратичной зависимости скорости этого процесса от плотности вещества $\propto \rho^2$), тем самым увеличивая населённость атомных уровней, ответственных за ускорение ветра [80]. Увеличение скорости ветра при фиксированной параметризации неоднородностей (с постоянными значениями f_1 , f_2 , f_3) смещает спад плотности сгустков во внешние области ветра, что увеличивает полное ускорение в спектральных линиях.

Как было показано в работе [81], параметризация неоднородностей в гидродинамических расчетах оказывает определяющее влияние на получаемые соотношения между темпом потери массы и терминальной скоростью. Для поиска модели, более приближенной к наблюдениям, были рассчитаны несколько самосогласованных моделей с различными распределениями сгустков вещества в ветре. Оптимальное соответствие с наблюдаемыми скоростями показала модель с $f_1 = 0.1$, $f_2 = 20 \text{ км с}^{-1}$ и $f_3 = 30 \text{ км с}^{-1}$. Увеличение значения f_3 позволило сместить положение минимума объемного фактора заполнения $f(r)$ на меньшие скорости, и, как следствие, уменьшить давление излучения g_{rad} в отдаленных частях ветра, при этом значимо не изменив баланс сил вблизи критической точки. В совокупности это привело к более низкой терминальной скорости $v_\infty \approx 230 \text{ км с}^{-1}$ в сравнении с начальной самосогласованной моделью ветра с $f_3 = 20 \text{ км с}^{-1}$ при прежнем значении массы звезды $M \approx 23 M_\odot$. Общий вид спектра финальной гидродинамической модели оказался практически идентичен виду спектра базовой модели, представленной в разделе 4.3 (рисунок 30). Основные параметры полученной самосогласованной модели протяженной атмосферы Var2 приведены в таблице 4. Светимость звезды в данной модели составляет $L_* = 6.5 \times 10^5 L_\odot$, что совпадает со значением в базовой модели и хорошо согласуется с наблюдаемой фотометрией. Это согласие достигается бла-

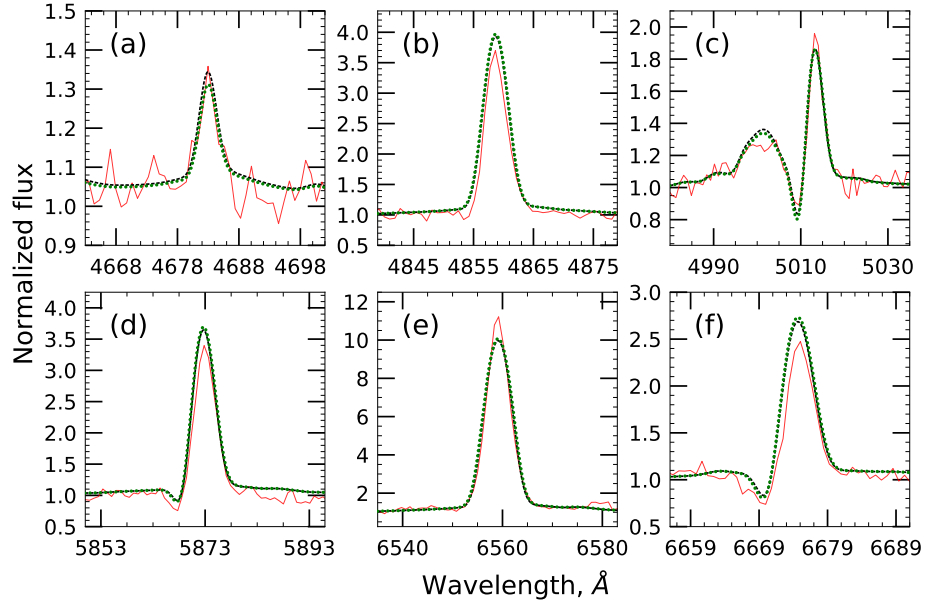


Рисунок 30 — Сравнение формы профиля некоторых линий в спектрах моделей при аналитическом задании скоростного распределения (черная штриховая линия) и самосогласованной скоростной структуре (зеленая пунктирная линия). Красным цветом показан нормированный наблюдаемый спектр Var 2. Набор линий аналогичен рисунку 7.

годаря тому, что распределение скорости ветра остаётся достаточно близким к распределению в базовой модели с аналитическим профилем скорости при том же темпе потери массы.

4.5 Эволюционный статус Var 2

В ходе самосогласованного не-ЛТР моделирования оптического спектра Var 2 были определены основные параметры звезды и ее ветра. Значения текущей массы, светимости и содержания водорода на поверхности являются ключевыми ограничениями при исследовании потенциального эволюционного пути рассматриваемой звезды.

На рисунке 31 показано положение Var 2 на диаграмме Герцшпрунга-Рассела для светимости $L = 6.5 \times 10^5, L_{\odot}$ и эффективной температуры $T_{\text{eff}} = 24.8 \text{ кК}$, полученных из моделирования. Согласно Женевским эволюционным моделям [7], положение Var 2 относительно эволюционных треков без учета вращения (рисунок 31, левая панель) находится между треками, соответствующими начальным массам звезды $40 M_{\odot}$ и $60 M_{\odot}$. Данные модели предсказывают, что когда невращающаяся звезда с $M_{\text{init}} = 40 M_{\odot}$ достигает текущей массы Var 2 ($M \approx 23 M_{\odot}$)

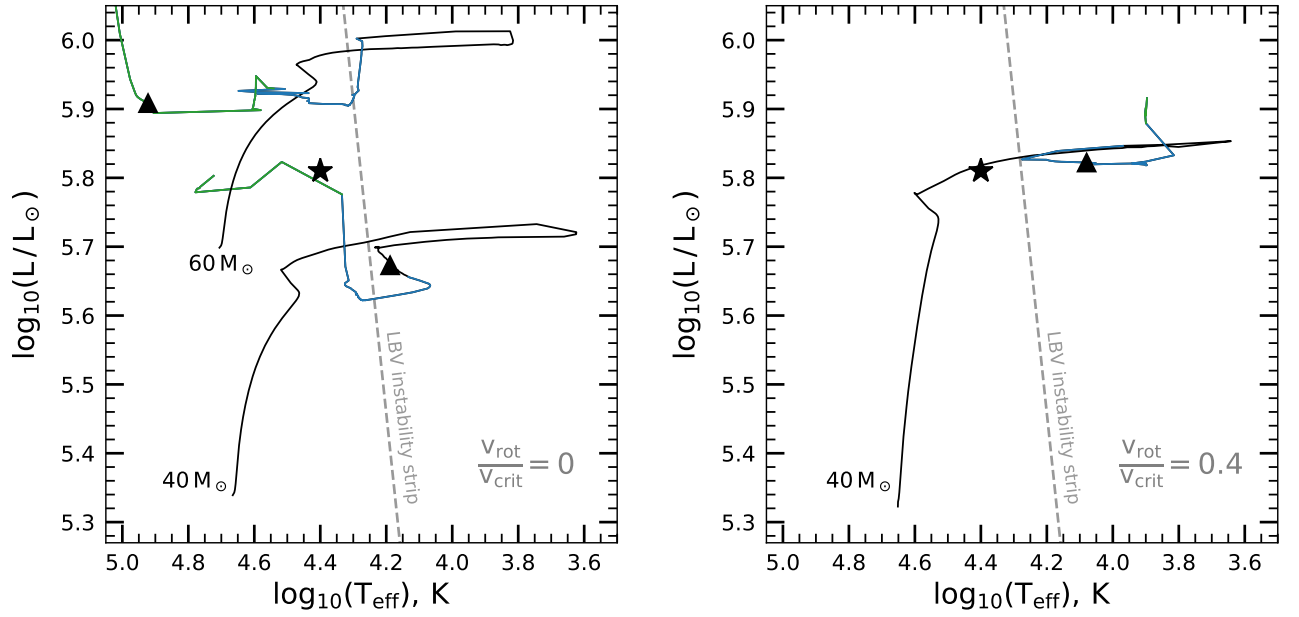


Рисунок 31 — Положение Var 2 (чёрная звезда) на диаграмме Герцшпрунга-Рассела вместе с Женевскими эволюционными треками для металличности $Z = 0.006$ [7], цвет которых соответствует содержанию водорода на поверхности звезды: $X_H > 40\%$ (чёрная сплошная линия), $20\% < X_H < 40\%$ (синяя сплошная линия) и $X_H < 20\%$ (зелёная сплошная линия). На левой и правой панелях показаны эволюционные треки без учета вращения и с вращением $v_{\text{rot}}/v_{\text{crit}} = 0.4$, соответственно. Чёрный треугольник отмечает положение на треке, соответствующее текущей массе Var 2 $M \approx 23 M_\odot$. Граница неустойчивости LBVs обозначена серой пунктирной линией [22].

и содержания водорода на поверхности $X_H \approx 40\%$ в возрасте $t_{\text{age}} \approx 4.8$ млн лет, её светимость $L \approx 4.8 \times 10^5 L_\odot$ и эффективная температура $T_{\text{eff}} \approx 15$ кК заметно ниже, чем у Var 2, тогда как звезда с $M_{\text{init}} = 60 M_\odot$ достигает массы Var 2 только тогда, когда она уже эволюционировала в звезду Вольфа-Райе углеродной последовательности (WC) со светимостью $L \approx 8.0 \times 10^5 L_\odot$ и эффективной температурой $T_{\text{eff}} \approx 80$ кК в возрасте $t_{\text{age}} \approx 4.0$ млн лет. Эволюционные треки с умеренной скоростью вращения $v_{\text{rot}}/v_{\text{crit}} = 0.4$ (рисунок 31, правая панель) показывают, что звезда с $M_{\text{init}} = 40 M_\odot$ будет иметь светимость и температуру, идентичные полученным для Var 2, только непосредственно после стадии главной последовательности, при этом в дальнейшем она не эволюционирует в WR-звезду после стадии красного сверхгиганта, что исключает данный эволюционный путь для Var 2, расположенной слева от полосы неустойчивости LBV [22]. Таким образом, можно заключить, что Var 2, вероятно, занимает промежуточное положение между эволюционными треками медленно вращающихся звёзд

с начальными массами $40 M_\odot$ и $60 M_\odot$, соответствуя звезде с $M_{\text{init}} \approx 50 M_\odot$ и $t_{\text{age}} \approx 4.4$ млн лет, которая эволюционирует от более низких температур в сторону WR-звезд.

4.6 Свойства ветра Var 2

В данной разделе будут сопоставлены свойства ветра Var 2, найденные в ходе самоогласованного не-ЛТР моделирования, со свойствами ветра других массивных звёзд.

Оптическая глубина ветра $\tau_W = \int_{r_c}^{\infty} \kappa_F \rho dr$ в самосогласованной модели протяженной атмосферы Var 2 составляет $\tau_W \approx 2$, что указывает на то, что ветер уже прошел переходную фазу и в данном состоянии более близок к ветрам поздних WN-звезд, нежели O-звезд [285–287]. Как было показано в работе [288], темп потери массы $\dot{M}_{\text{trans}}$, соответствующий транзиту от O-звезд к WR-звездам, может быть определен из соотношения между параметром эффективности ветра η и переходной оптической глубиной $\tau_W = 1$:

$$\eta \equiv \frac{\dot{M} v_\infty}{L/c} = f_{\text{corr}} \tau_W = f_{\text{corr}}, \quad (17)$$

где $f_{\text{corr}} \simeq (\Gamma - 1)/\Gamma$ – корректирующий множитель, выражаемый через фактор Эддингтона $\Gamma = g_{\text{rad}}/g_{\text{grav}}$. Таким образом, с учетом оптической глубины ветра в полученной модели $\tau_W \approx 2$, переходный темп потери массы Var 2 находится на уровне примерно вдвое ниже наблюдаемого $\dot{M}_{\text{trans}} \approx 10^{-5} M_\odot \text{ год}^{-1}$. В свою очередь, соответствующая величина корректирующего множителя $f_{\text{corr}} \approx 0.2$ оказалась меньше значения $f_{\text{corr}} = 0.6$, полученного в исследовании [288] для наиболее массивных звезд скопления Арки

Как было показано в разделе 4.4, базовая модель ветра Var 2 с $\beta = 1.0$ недооценивает ускорение ветра звезды, поэтому при переходе к самосогласованной модели вклад оптически толстых линий в общее давление излучения увеличивается, так как $g_{\text{rad}}^{\text{thick}} \propto \frac{dv}{dr}/\rho r^2$. Учитывая, что радиативное ускорение в континууме ($g_{\text{rad}}^{\text{cont}} \propto 1/r^2$) и оптически тонких линиях ($g_{\text{rad}}^{\text{thin}} \propto 1/r^2$) не зависят от градиента скорости, можно оценить эффективное отношение ускорения в оптически толстых линиях к общему давлению излучения $\alpha = g_{\text{rad}}^{\text{thick}}/g_{\text{rad}}^{\text{tot}}$. Данное соотношение используется для параметризации давления излучения в рамках классической теории звездных ветров [289–291]. В транзвуковой части

ветра полученные значения α лежат в диапазоне $\approx 0.06 - 0.25$, что указывает на относительно умеренную зависимость радиативного ускорения от градиента скорости.

Можно заключить, что ветер Var 2 с точки зрения соотношения $g_{\text{rad}}^{\text{thick}}/g_{\text{rad}}^{\text{tot}}$ занимает промежуточное место между оптическими тонкими ветрами О-звезд с $\alpha \approx 0.5 - 0.7$ [292–294] и наиболее плотными ветрами звезд Вольфа-Райе, для которых $\alpha \rightarrow 0$ [82]. Похожий результат был получен в работе [83] при расчете самосогласованных моделей ветра поздних WN-звезд, разделяющих множество наблюдательных особенностей с некоторыми LBVs/cLBVs [118, 151]. Как было отмечено в исследовании [82], в подобном случае значение α не обязательно точно описывает реальное распределение линий в ветре, а скорее указывает на сильное влияние многочисленных радиационных эффектов, таких как излучение вследствие каскадных рекомбинаций или значительное наложение линий, на величину α .

Как видно на рисунке 29 (синяя линия), зону ускорения ветра полученной самосогласованной модели можно условно разделить на две части. Эти области соответствуют разным ионизационным состояниям элементов железной группы: основной вклад в ускорение ветра во внутренней и внешней частях протяженной атмосферы вносят ионы Fe IV и Fe III, соответственно. Вследствие того, что в протяженной атмосфере звезды газ находится в подобном пограничном состоянии, даже незначительные вариации параметров модели могут привести к сильному изменению ионизационного баланса в ветре. С таким хрупким равновесием внешних частей ветра может быть связана переменность профилей линий, наблюдающаяся в спектрах LBVs [295–297] и голубых сверхгигантов [183, 270, 298]. Отметим, что во внутренних частях ветра Fe IV остается доминирующим ионом железа во всех моделях, представленных выше, в отличие от звезд, пересекающих би-стабильный предел, в ветрах которых происходит рекомбинация ионов Fe IV в Fe III вблизи критической точки [208, 299], что оказывает существенное влияние на темп потери массы [23, 277] и, таким образом, играет ключевую роль в эволюции массивных звезд [300, 301].

Двухкомпонентный профиль скорости самосогласованной модели ветра не может быть полностью описан стандартным степенным распределением (рисунк 29, синяя линия). Для точного воспроизведения распределения скорости ветра Var 2 необходимо использование сложной формы β -закона с двумя

зонами ускорения вещества [66, 82]. Грубая аппроксимация скорости ветра в гидродинамической модели формой скоростного профиля, задаваемой простым аналитическим законом с различными значениями β (выражение 4) показала, что ускорение ветра наилучшим образом описывается при $\beta \approx 0.8$. Полученное скоростное распределение оказалось ближе к характеру ускорения ветра ОБ-сверхгигантов $\beta \approx 0.5 - 1.5$ [225, 253], чем к скоростному профилю ветра поздних азотных WR-звезд (WNL) $\beta \approx 1.4 - 1.7$ [83, 226]. Напротив, найденное отношение момента ветра $\dot{M}v_\infty$ к светимости Var 2 хорошо соответствует ветрам WNL-звезд [302–304]. При этом Var 2 имеет более низкую терминальную скорость ветра $v_\infty \approx 230 \text{ км с}^{-1}$ в сравнении с типичными сверхгигантами ранних спектральных классов или WNL-звездами (см. ссылки выше), что, вероятно, связано с близостью LBVs к пределу Эддингтона [13, 151].

Спектры Var 2 за пределами оптического диапазона отсутствуют, что ограничило в рамках данной работы возможность исследования распределения сгустков вещества с радиусом – характеристики, тесно связанной со скоростной структурой ветра. Поэтому в представленных моделях была использована параметризация неоднородностей ветра, полученная из многодиапазонных исследований других массивных звёзд, с внесением незначительных коррекций, сделанных в ходе гидродинамических расчётов для согласования моделей с наблюдаемой скоростью ветра Var 2. Будущая проверка подобных самосогласованных не-ЛТР моделей для медленных и плотных ветров LBVs, как с точки зрения профиля скорости, так и распределения неоднородностей в ветре, может быть выполнена с использованием спектральных данных, охватывающих более широкий диапазон длин волн.

4.7 Звездное окружение

Данный раздел посвящен анализу ближайшего звездного окружения Var 2. Как показано на рисунке 32, Var 2 расположена на расстоянии ~ 100 пк от крупной области звездообразования. Также недалеко от данной LBV расположены несколько менее ярких голубых звезд. Для исследования звездного населения двух выделенных на рисунке 32 областей использовался каталог фотометрических данных для галактики M33, составленный по наблюдательным данным HST [305]. На основе фотометрии, представленной в каталоге, была построена диаграмма "показатель цвета–звездная величина" для звёзд выбранных реги-

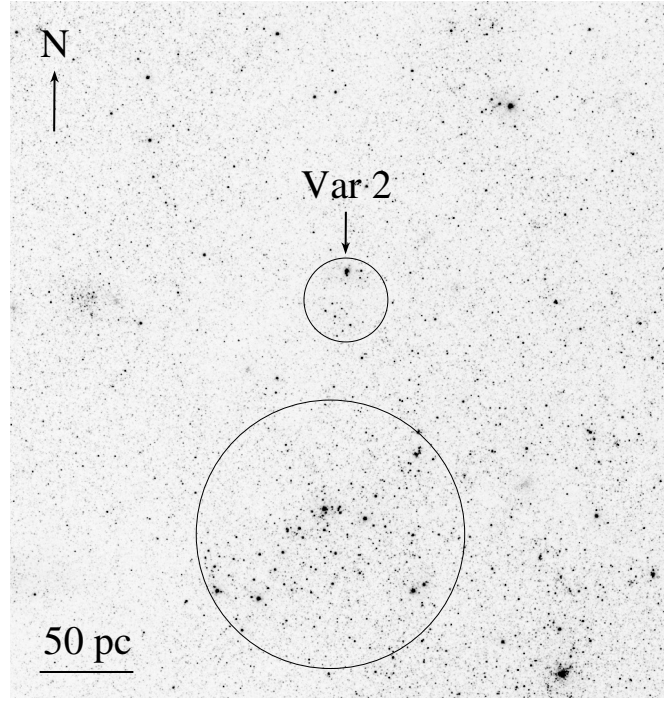


Рисунок 32 — Изображение участка галактики M33 вблизи Var 2 в фильтре *F814W*, полученное камерой ACS/WFC HST. Кругами отмечены звездные ассоциации, возраст которых оценивается по диаграмме "показатель цвета — звёздная величина".

онов (рисунок 33). Анализ возрастов звездных групп проводился при помощи изохрон, рассчитанных с использованием кода PARSEC¹⁴, предназначенного для эволюционного моделирования [306]. При расчёте изохрон использовано значение межзвёздного поглощения $A_V = 0.54$ (при $R_V = 3.39$, [142]), полученное в разделе 4.3.

Согласно рисунку 33, положение наиболее молодого звездного населения обеих областей оптимально описывается изохроной с возрастом $t_{\text{age}} \approx 5$ млн лет, что хорошо согласуется с оценкой возраста Var 2, полученной в разделе 4.4. В случае, если Var 2 была изначально сформирована в отдаленной протяженной области звездообразования, ее минимальная проекционная скорость относительно ближайшей группы голубых звезд должна составлять примерно $v_{\text{proj}} \approx 20 \text{ км с}^{-1}$. Данная оценка близка к типичным наблюдаемым скоростям ОВ-звезд $v_{\text{proj}} \approx 10 \text{ км с}^{-1}$ [103, 169] и скоростям выброшенных из скоплений массивных О-звезд $v_{\text{ej}} \approx 10 - 20 \text{ км с}^{-1}$, полученным из решения задачи N-тел [106, 307].

В итоге, потенциально, Var 2 могла образоваться в любой из двух рассмат-

¹⁴<https://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd>

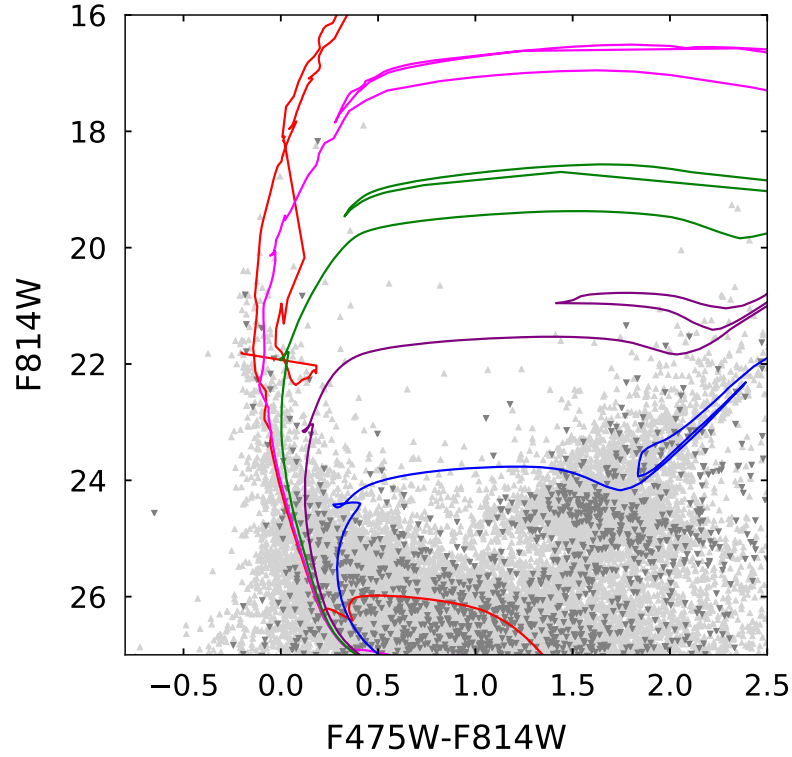


Рисунок 33 — Диаграмма "показатель цвета – звездная величина" для звёзд из выделенных на рисунке 32 областей. Светло-серыми и темно-серыми треугольниками обозначены звёзды большой и малой областей соответственно. Теоретические изохроны, рассчитанные на основе эволюционного кода PARSEC, возраста 5, 10, 30, 100 и 400 млн отмечены красной, розовой, зелёной, фиолетовой и синей кривыми, соответственно.

риваемых звездных групп, однако, как было показано в разделе 4.2, в непосредственной близости от Var 2, находятся две относительно яркие голубые звезды, что может указывать на принадлежность Var 2 именно к этой малочисленной звездной группе ввиду малой вероятности обнаружения трех подобных объектов в проекционном круге радиусом $\approx 0.6''$. Для проверки данной гипотезы была рассчитана вероятность подобного пространственного распределения рассматриваемых звезд. В рамках предположения о Пуассоновском распределении числа звезд в пределах радиуса r вероятность найти n звезд в заданной области определяется как:

$$P_n(r) = \frac{u^n}{n!} \exp(-u), \quad (18)$$

где $u = \pi r^2 \delta$ – среднее число звезд с общей проекционной плотностью δ в пределах круга радиусом r . Величина δ может быть выражена через среднее расстояние между двумя ближайшими звездами выборки $\langle d \rangle$ [126]:

$$\delta \approx \left(\frac{3}{2\langle d \rangle} \right)^2. \quad (19)$$

Вычисление статистической вероятности заданного пространственного распределения объектов проводилось на основе выборки звезд горячее спектрального класса В0 с $M_{\text{bol}} \lesssim -7.0 \text{ mag}$ (болометрическая поправка для звезд данных спектральных классов ВС $\lesssim -3.0 \text{ mag}$, [308]), что примерно соответствует светимости звезд, окружающих Var 2. Отбор звезд осуществлялся при помощи соотношений $m_{\text{F475W}} < 21 \text{ mag}$ и $(m_{\text{F336W}} - m_{\text{F475W}}) < -1.0 \text{ mag}$ с использованием фотометрических данных каталога [305]. Расчет проекционной плотности выбранных ОВ-звезд проводился в локальной области радиусом $100''$ вокруг Var 2. Вероятность найти 3 голубые звезды с $M_{\text{bol}} \lesssim -7.0 \text{ mag}$ в пределах круга с $r = 0.6''$ оказалось равной $P_3(0.6'') \approx 10^{-4}$.

Низкая вероятность приводит к мысли, что Var 2 могла сформироваться в малочисленной звездной группе в непосредственной близости от своего текущего местоположения, а не была выброшена из какого-либо удаленного скопления, связанного с крупной областью звездообразования. Дальнейшее исследование звезд предельной светимости за пределами скоплений может улучшить понимание возможных механизмов образования подобных объектов.

4.8 Выводы главы 4

Представленная в главе 4 работа представляет собой первое самосогласованное не-ЛТР моделирование спектра подтвержденной LBV, выполненное на примере объекта Var 2. Эта LBV пребывает в "спящем" состоянии, не проявляя заметной переменности на протяжении последних десятилетий после постепенного снижения блеска с максимума в 1920-х годах. Учитывая ограниченную выборку LBVs с надёжно определёнными параметрами, данная работа является важным шагом вперёд в понимании природы звёзд LBV и подобных им звёзд.

Полученные значения светимости $L = 6.5 \times 10^5 L_{\odot}$, массы $M_* \approx 23 M_{\odot}$ и содержания водорода на поверхности $X_{\text{H}} \approx 43\%$ соответствует звезде с начальной массой $M_{\text{init}} = 50 M_{\odot}$ и возрастом $t_{\text{age}} \approx 4.4 \times 10^6$ лет. Эта точка на эволюционном треке соответствует переходу проэволюционировавшей массивной звезды в фазу звезды Вольфа-Райе, что согласуется с классическим сценарием Конти.

Более того, свойства ветра Var 2 также подтверждают её промежуточное эволюционное состояние. С учетом полученных оценок возраста, Var 2 потенциально могла вылететь из скопления, связанного с ближайшей крупной областью звездообразования, находящейся на расстоянии ~ 100 пк. Однако, статистический анализ проекционного распределения звезд в окрестности Var 2 свидетельствует в пользу того, что данная LBV могла сформироваться в локальной малонаселенной группе.

Заключение

В рамках диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

- Выполнено исследование пространственного распределения LBVs и различных LBV-кандидатов относительно центров ближайших ОБ-ассоциаций в галактике М33. Поиск групп голубых звезд проводился на основе данных Local Group Galaxies Survey при помощи алгоритмов DBSCAN и OPTICS, начальные параметры которых были подобраны в ходе Монте-Карло моделирования проекционного расположения молодых массивных звезд с учетом различной плотности фонового окружения. Распределение расстояний до ближайшей ОБ-ассоциации, полученное для полной выборки LBV/cLBV, оказалось близко к распределениям, показываемым наиболее массивными голубыми звездами и красными сверхгигантами, а также звездами Вольфа-Райе, что соответствует стандартному предположению о природе ярких голубых переменных как промежуточной стадии эволюции наиболее массивных одиночных звезд. Однако, LBV-кандидаты, классифицированные как Fe II-звезды, продемонстрировали значимую изоляцию в сравнении с другими массивными звездами, что в совокупности с некоторыми особенностями их спектров косвенно указывает на то, что они могут быть продуктом эволюции тесной двойной системы с обменом массы.
- Получены оценки основных параметров ветра LBV-кандидата MN112 при помощи не-ЛТР моделирования оптического и инфракрасного спектров. Наилучшее соответствие между моделью и наблюдаемыми спектрами было достигнуто при светимости $L = 5.77 \times 10^5 L_{\odot}$, эффективной температуре $T_{\text{eff}} = 15200 \text{ K}$, темпе потери массы $\dot{M} = 3.63 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ($\dot{M}_{\text{cl}} = 5.74 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$), терминальной скорости ветра $v_{\infty} = 300 \text{ km s}^{-1}$ и скоростном законе $\beta = 3.4$. Параметры полученной модели указывают на наличие у MN112 протяженной фотосферы, формируемой плотным ветром с пологим скоростным профилем. Химический состав ветра MN112 близок к составу её прототипа – звезды P Cygni, однако характеризуется несколько меньшим содержанием водорода (соотношение He/H по числу атомов составляет примерно 0.37 и 0.29 для MN112 и P Cygni, соответственно).

- Рассчитана сетка не-ЛТР моделей протяженных атмосфер в диапазоне температур $12000 \text{ K} \lesssim T_* \lesssim 40000 \text{ K}$ и на её основе построены диаграммы эквивалентных ширин ряда характеристических линий, которые дают возможность делать массовые оценки температуры и темпа потери массы LBVs и ряда других объектов с протяженными атмосферами. Показано, что полученные с использованием представленных диаграмм оценки на удовлетворительном уровне согласуются со значениями темпа потери массы и эффективной температуры, найденными в результате детального моделирования. Впервые были представлены результаты оценки параметров ветра ультра-ярких рентгеновских источников.
- Рассчитана самосогласованная гидродинамическая не-ЛТР модель протяженной атмосферы LBV Var 2, учитывающая баланс радиальных сил в ветре звезды. Полученные параметры Var 2 ($L = 6.5 \times 10^5 L_\odot$, $M_* \approx 23 M_\odot$, $X_H \approx 43\%$) соответствуют звезде с $M_{\text{init}} = 50 M_\odot$ и возрастом $t_{\text{age}} \approx 4.4 \times 10^6$ лет, эволюционирующей от звезд с более низкими температурами в сторону WR-звезд. Профиль скорости ветра Var 2 оказался близок к характеру ускорения ветров ОВ-сверхгигантов при меньшей терминальной скорости $v_\infty \approx 230 \text{ km s}^{-1}$. В то же время, для полученной оценки темпа потери массы $\dot{M} = 2.1 \times 10^{-5} M_\odot \text{ год}^{-1}$, соотношение между моментом ветра и светимостью соответствует значениям, найденным для WNL-звезд. Статистический анализ проекционного распределения звезд в окрестности Var 2 свидетельствует в пользу того, что данная LBV могла сформироваться в локальной малонаселенной группе.

Список литературы

- [1] Stellar wind properties of the nearly complete sample of O stars in the low metallicity young star cluster NGC 346 in the SMC galaxy / M. J. Rickard, R. Hainich, W. R. Hamann et al. // [A&A](#). — 2022. — Oct. — Vol. 666. — P. A189. — 2207.09333.
- [2] Stellar wind yields of very massive stars / Erin R. Higgins, Jorick S. Vink, Raphael Hirschi et al. // [MNRAS](#). — 2023. — Nov. — Vol. 526, no. 1. — P. 534–547. — 2308.10941.
- [3] Davidson K. Radiation-Driven Stellar Eruptions // [Galaxies](#). — 2020. — Feb. — Vol. 8, no. 1. — P. 10. — 2009.02340.
- [4] Mukhija B., Kashi A. Giant Eruptions in Massive Stars and their Effect on the Stellar Structure // [ApJ](#). — 2024. — Oct. — Vol. 974, no. 1. — P. 124. — 2408.01718.
- [5] Arnett D. Supernovae and nucleosynthesis: an investigation of the history of matter, from the big bang to the present. — Princeton University Press, 1996. — Vol. 7.
- [6] Langer N. [Open questions in massive star research](#) // Massive Stars Near and Far / Ed. by Jonathan Mackey, Jorick S. Vink, Nicode St-Louis. — Vol. 361 of IAU Symposium. — 2024. — Jan. — P. 1–11. — 2209.04165.
- [7] Grids of stellar models with rotation. VI. Models from 0.8 to 120 $M_{\odot}$ at a metallicity $Z = 0.006$ / Patrick Eggenberger, Sylvia Ekström, Cyril Georgy et al. // [A&A](#). — 2021. — Aug. — Vol. 652. — P. A137. — 2201.12262.
- [8] Bonn Optimized Stellar Tracks (BoOST). Simulated populations of massive and very massive stars for astrophysical applications / Dorottya Szécsi, Poojan Agrawal, Richard Wünsch, Norbert Langer // [A&A](#). — 2022. — Feb. — Vol. 658. — P. A125. — 2004.08203.
- [9] Maeder A., Meynet G. Stellar evolution with rotation. VI. The Eddington and Omega -limits, the rotational mass loss for OB and LBV stars // [A&A](#). — 2000. — Sep. — Vol. 361. — P. 159–166. — astro-ph/0006405.

- [10] Maeder A., Meynet G. Evolution of massive stars with mass loss and rotation // [New A Rev.](#) — 2010. — Mar. — Vol. 54, no. 3-6. — P. 32–38.
- [11] Evolution of rotating massive stars with new hydrodynamic wind models / A. C. Gormaz-Matamala, J. Cuadra, G. Meynet, M. Curé // [A&A](#). — 2023. — May. — Vol. 673. — P. A109. — 2303.13058.
- [12] Meynet G., Maeder A. Stellar evolution with rotation. XI. Wolf-Rayet star populations at different metallicities // [A&A](#). — 2005. — Jan. — Vol. 429. — P. 581–598. — astro-ph/0408319.
- [13] Humphreys R. M., Davidson K. The luminous blue variables: Astrophysical geysers // [PASP](#). — 1994. — Oct. — Vol. 106. — P. 1025–1051.
- [14] de Jager C. The yellow hypergiants // [A&A Rev.](#) — 1998. — Jan. — Vol. 8, no. 3. — P. 145–180.
- [15] van Genderen A. M. S Doradus variables in the Galaxy and the Magellanic Clouds // [A&A](#). — 2001. — Feb. — Vol. 366. — P. 508–531.
- [16] Weis K., Bomans D. J. Luminous Blue Variables // [Galaxies](#). — 2020. — Feb. — Vol. 8, no. 1. — P. 20. — 2009.03144.
- [17] A Survey of Local Group Galaxies Currently Forming Stars. III. A Search for Luminous Blue Variables and Other H α Emission-Line Stars / P. Massey, R. T. McNeill, K. A. G. Olsen et al. // [AJ](#). — 2007. — Dec. — Vol. 134. — P. 2474–2503. — 0709.1267.
- [18] Clark J. S., Larionov V. M., Arkharov A. On the population of galactic Luminous Blue Variables // [A&A](#). — 2005. — May. — Vol. 435. — P. 239–246.
- [19] Sterken C. Cycles and cyclicities in Luminous Blue Variables: the S Dor phenomenon // Interplay of Periodic, Cyclic and Stochastic Variability in Selected Areas of the H-R Diagram / Ed. by C. Sterken. — Vol. 292 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 2003. — Mar. — P. 437.
- [20] de Groot M., Sterken C., van Genderen A. M. Cyclicities in the light variations of S Doradus stars III. P Cygni // [A&A](#). — 2001. — Sep. — Vol. 376. — P. 224–231.

- [21] Lefever K., Puls J., Aerts C. Statistical properties of a sample of periodically variable B-type supergiants. Evidence for opacity-driven gravity-mode oscillations // [A&A](#). — 2007. — Mar. — Vol. 463, no. 3. — P. 1093–1109. — astro-ph/0611484.
- [22] Bona Fide, Strong-Variable Galactic Luminous Blue Variable Stars are Fast Rotators: Detection of a High Rotational Velocity in HR Carinae / J. H. Groh, A. Damineli, D. J. Hillier et al. // [ApJ](#). — 2009. — Nov. — Vol. 705, no. 1. — P. L25–L30. — 0909.4459.
- [23] Pauldrach A. W. A., Puls J. Radiation-driven winds of hot luminous stars. VIII. The bistable wind of the luminous blue variable P Cygni (B1 Ia+). // [A&A](#). — 1990. — Oct. — Vol. 237. — P. 409.
- [24] SN 1997bs in M66: Another Extragalactic η Carinae Analog? / Schuyler D. Van Dyk, Chien Y. Peng, Jennifer Y. King et al. // [PASP](#). — 2000. — Dec. — Vol. 112, no. 778. — P. 1532–1541. — astro-ph/0009027.
- [25] Discovery of Precursor Luminous Blue Variable Outbursts in Two Recent Optical Transients: The Fitfully Variable Missing Links UGC 2773-OT and SN 2009ip / Nathan Smith, Adam Miller, Weidong Li et al. // [AJ](#). — 2010. — Apr. — Vol. 139, no. 4. — P. 1451–1467. — 0909.4792.
- [26] Smith N., Owocki S. P. On the Role of Continuum-driven Eruptions in the Evolution of Very Massive Stars and Population III Stars // [ApJ](#). — 2006. — Jul. — Vol. 645, no. 1. — P. L45–L48. — astro-ph/0606174.
- [27] The Unusual Temporal and Spectral Evolution of SN2011ht. II. Peculiar Type IIn or Impostor? / Roberta M. Humphreys, Kris Davidson, Terry J. Jones et al. // [ApJ](#). — 2012. — Nov. — Vol. 760, no. 1. — P. 93. — 1207.5755.
- [28] Davidson K., Humphreys R. M. Eta Carinae and Its Environment // [ARA&A](#). — 1997. — Jan. — Vol. 35. — P. 1–32.
- [29] Smith N., Frew D. J. A revised historical light curve of Eta Carinae and the timing of close periastron encounters // [MNRAS](#). — 2011. — Aug. — Vol. 415, no. 3. — P. 2009–2019. — 1010.3719.

- [30] Light echoes reveal an unexpectedly cool η Carinae during its nineteenth-century Great Eruption / A. Rest, J. L. Prieto, N. R. Walborn et al. // [Nature](#). — 2012. — Feb. — Vol. 482. — P. 375–378. — 1112.2210.
- [31] Mass and Kinetic Energy of the Homunculus Nebula around η Carinae / Nathan Smith, Robert D. Gehrz, Philip M. Hinz et al. // [AJ](#). — 2003. — Mar. — Vol. 125, no. 3. — P. 1458–1466.
- [32] Smith N. Mass Loss: Its Effect on the Evolution and Fate of High-Mass Stars // [ARA&A](#). — 2014. — Aug. — Vol. 52. — P. 487–528. — 1402.1237.
- [33] Lamers H. J. G. L. M., de Groot M. J. H. Observed evolutionary changes in the visual magnitude of the luminous blue variable P Cygni. // [A&A](#). — 1992. — Apr. — Vol. 257. — P. 153–162.
- [34] 5 yr of BRITE-Constellation photometry of the luminous blue variable P Cygni: properties of the stochastic low-frequency variability / Ashley Elliott, Noel D. Richardson, Herbert Pablo et al. // [MNRAS](#). — 2022. — Jan. — Vol. 509, no. 3. — P. 4246–4255. — 2110.12056.
- [35] GR 290 (Romano’s Star). II. Light History and Evolutionary State / V. F. Polcaro, O. Maryeva, R. Nesci et al. // [AJ](#). — 2016. — Jun. — Vol. 151, no. 6. — P. 149. — 1603.07284.
- [36] A new and unusual LBV-like outburst from a Wolf-Rayet star in the outskirts of M33 / Nathan Smith, Jennifer E Andrews, Maxwell Moe et al. // [MNRAS](#). — 2020. — Mar. — Vol. 492, no. 4. — P. 5897–5915. — 2001.02725.
- [37] How long can luminous blue variables sleep? A long-term photometric variability and spectral study of the Galactic candidate luminous blue variable MN 112 / O. V. Maryeva, S. V. Karpov, A. Y. Kniazev, V. V. Gvaramadze // [MNRAS](#). — 2022. — Jul. — Vol. 513, no. 4. — P. 5752–5765. — 2205.14542.
- [38] Conti P. S. On the relationship between Of and WR stars. // *Memoires of the Societe Royale des Sciences de Liege*. — 1975. — Jan. — Vol. 9. — P. 193–212.
- [39] Conti P. S. Basic Observational Constraints on the Evolution of Massive Stars // *Observational Tests of the Stellar Evolution Theory* / Ed. by A. Maeder, A. Renzini. — Vol. 105. — 1984. — Jan. — P. 233.

- [40] Maryeva O. V. Wolf-Rayet Stars – what we Know and what we Don’t // [Azerbaijani Astronomical Journal](#). — 2024. — Dec. — Vol. 19, no. 2. — P. 73–90. — 2412.05772.
- [41] Maeder A., Conti P. S. Massive Star Populations in Nearby Galaxies // [ARA&A](#). — 1994. — Jan. — Vol. 32. — P. 227–275.
- [42] Groh J. H., Meynet G., Ekström S. Massive star evolution: luminous blue variables as unexpected supernova progenitors // [A&A](#). — 2013. — Feb. — Vol. 550. — P. L7. — 1301.1519.
- [43] Multiple Outflows in the Giant Eruption of a Massive Star / R. M. Humphreys, J. C. Martin, M. S. Gordon, T. J. Jones // [ApJ](#). — 2016. — Aug. — Vol. 826. — P. 191. — 1606.04959.
- [44] Gal-Yam A., Leonard D. C. A massive hypergiant star as the progenitor of the supernova SN 2005gl // [Nature](#). — 2009. — Apr. — Vol. 458, no. 7240. — P. 865–867.
- [45] Spectral Evolution of the Extraordinary Type IIn Supernova 2006gy / Nathan Smith, Ryan Chornock, Jeffrey M. Silverman et al. // [ApJ](#). — 2010. — Feb. — Vol. 709, no. 2. — P. 856–883. — 0906.2200.
- [46] Modeling the remnants of core-collapse supernovae from luminous blue variable stars / S. Ustamujic, S. Orlando, M. Miceli et al. // [A&A](#). — 2021. — Oct. — Vol. 654. — P. A167. — 2108.01951.
- [47] Smith N., McCray R. Shell-shocked Diffusion Model for the Light Curve of SN 2006gy // [ApJ](#). — 2007. — Dec. — Vol. 671, no. 1. — P. L17–L20. — 0710.3428.
- [48] SN 2006tf: Precursor Eruptions and the Optically Thick Regime of Extremely Luminous Type IIn Supernovae / Nathan Smith, Ryan Chornock, Weidong Li et al. // [ApJ](#). — 2008. — Oct. — Vol. 686, no. 1. — P. 467–484. — 0804.0042.
- [49] Choi J., Conroy C., Byler N. The Evolution and Properties of Rotating Massive Star Populations // [ApJ](#). — 2017. — Apr. — Vol. 838, no. 2. — P. 159. — 1702.04722.

- [50] Bona Fide, Strong-Variable Galactic Luminous Blue Variable Stars are Fast Rotators: Detection of a High Rotational Velocity in HR Carinae / J. H. Groh, A. Damineli, D. J. Hillier et al. // [ApJ](#). — 2009. — Nov. — Vol. 705. — P. L25–L30. — 0909.4459.
- [51] Justham S., Podsiadlowski P., Vink J. S. Luminous Blue Variables and Superluminous Supernovae from Binary Mergers // [ApJ](#). — 2014. — Dec. — Vol. 796, no. 2. — P. 121. — 1410.2426.
- [52] Smith N. Luminous blue variables and the fates of very massive stars // [Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A](#). — 2017. — Sep. — Vol. 375, no. 2105. — P. 20160268.
- [53] Smith N., Tombleson R. Luminous blue variables are antisocial: their isolation implies that they are kicked mass gainers in binary evolution // [MNRAS](#). — 2015. — Feb. — Vol. 447. — P. 598–617. — 1406.7431.
- [54] On the Social Traits of Luminous Blue Variables / R. M. Humphreys, K. Weis, K. Davidson, M. S. Gordon // [ApJ](#). — 2016. — Jul. — Vol. 825. — P. 64. — 1603.01278.
- [55] Smith N. The isolation of luminous blue variables: on subdividing the sample // [MNRAS](#). — 2016. — Sep. — Vol. 461, no. 3. — P. 3353–3360. — 1607.01054.
- [56] Davidson K., Humphreys R. M., Weis K. LBVs and Statistical Inference // [arXiv e-prints](#). — 2016. — Aug. — P. arXiv:1608.02007. — 1608.02007.
- [57] Modelling luminous-blue-variable isolation / Mojgan Aghakhanloo, Jeremiah W. Murphy, Nathan Smith, Renée Hložek // [MNRAS](#). — 2017. — Nov. — Vol. 472, no. 1. — P. 591–603. — 1701.05626.
- [58] Shedding Light on the Isolation of Luminous Blue Variables / Erin Aadland, Philip Massey, Kathryn F. Neugent, Maria R. Drout // [AJ](#). — 2018. — Dec. — Vol. 156, no. 6. — P. 294. — 1810.11169.
- [59] Smith N. The isolation of luminous blue variables resembles aging B-type supergiants, not the most massive unevolved stars // [MNRAS](#). — 2019. — Nov. — Vol. 489, no. 3. — P. 4378–4388. — 1908.06104.

- [60] Chentsov E. L. On the “Sociality” of Several White Hypergiants // [Astrophysical Bulletin](#). — 2021. — Jul. — Vol. 76, no. 3. — P. 286–291.
- [61] Kinematics of luminous blue variables in the Large Magellanic Cloud / Mojgan Aghakhanloo, Nathan Smith, Jennifer Andrews et al. // [MNRAS](#). — 2022. — Oct. — Vol. 516, no. 2. — P. 2142–2161. — 2202.06887.
- [62] Deman J. A., Oey M. S. Kinematic Insights into Luminous Blue Variables and B[e] Supergiants // [ApJ](#). — 2024. — Nov. — Vol. 976, no. 1. — P. 125. — 2410.06448.
- [63] New luminous blue variable candidates in the NGC 247 galaxy / Y. Solovyeva, A. Vinokurov, A. Sarkisyan et al. // [MNRAS](#). — 2020. — Oct. — Vol. 497, no. 4. — P. 4834–4842. — 2008.06215.
- [64] Search for LBVs in the Local Volume galaxies: study of four stars in NGC 4449 / Y. Solovyeva, A. Vinokurov, A. Sarkisyan et al. // [MNRAS](#). — 2021. — Nov. — Vol. 507, no. 3. — P. 4352–4366. — 2208.05892.
- [65] Search for LBVs in the Local Volume galaxies: study of two stars in NGC 1156 / Y. Solovyeva, A. Vinokurov, N. Tikhonov et al. // [MNRAS](#). — 2023. — Jan. — Vol. 518, no. 3. — P. 4345–4356. — 2208.05858.
- [66] Hillier D. J., Miller D. L. Constraints on the Evolution of Massive Stars through Spectral Analysis. I. The WC5 Star HD 165763 // [ApJ](#). — 1999. — Jul. — Vol. 519. — P. 354–371.
- [67] Hamann W.-R., Gräfener G., Liermann A. The Galactic WN stars: line-blanketed analyses versus evolutionary models // *Stellar Evolution at Low Metallicity: Mass Loss, Explosions, Cosmology* / Ed. by H. J. G. L. M. Lamers, N. Langer, T. Nugis, K. Annuk. — Vol. 353 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 2006. — Dec. — P. 185.
- [68] Atmospheric NLTE-models for the spectroscopic analysis of blue stars with winds. II. Line-blanketed models / J. Puls, M. A. Urbaneja, R. Venero et al. // [A&A](#). — 2005. — May. — Vol. 435. — P. 669–698. — astro-ph/0411398.

- [69] Pauldrach A. W. A., Hoffmann T. L., Lennon M. Radiation-driven winds of hot luminous stars. XIII. A description of NLTE line blocking and blanketing towards realistic models for expanding atmospheres // [A&A](#). — 2001. — Aug. — Vol. 375. — P. 161–195.
- [70] Lanz T., Hubeny I. A Grid of Non-LTE Line-blanketed Model Atmospheres of O-Type Stars // [ApJS](#). — 2003. — Jun. — Vol. 146, no. 2. — P. 417–441. — astro-ph/0210157.
- [71] A new mass estimate method with hydrodynamical atmospheres for very massive WNh stars / Gautham N. Sabhahit, Jorick S. Vink, Andreas A. C. Sander et al. // [A&A](#). — 2025. — Apr. — Vol. 696. — P. A200. — 2502.14957.
- [72] Davidson K. The Relation between Apparent Temperature and Mass-Loss Rate in Hypergiant Eruptions // [ApJ](#). — 1987. — Jun. — Vol. 317. — P. 760.
- [73] Najarro F., Hillier D. J., Stahl O. A spectroscopic investigation of P Cygni. I. H and HeI lines. // [A&A](#). — 1997. — Oct. — Vol. 326. — P. 1117–1134.
- [74] On the Nature of the Prototype Luminous Blue Variable Ag Carinae. I. Fundamental Parameters During Visual Minimum Phases and Changes in the Bolometric Luminosity During the S-Dor Cycle / J. H. Groh, D. J. Hillier, A. Damineli et al. // [ApJ](#). — 2009. — Jun. — Vol. 698, no. 2. — P. 1698–1720. — 0904.2363.
- [75] Wind and nebula of the M 33 variable GR 290 (WR/LBV) / O. Maryeva, G. Koenigsberger, O. Egorov et al. // [A&A](#). — 2018. — Sep. — Vol. 617. — P. A51. — 1804.10940.
- [76] Bright OB stars in the Galaxy. III. Constraints on the radial stratification of the clumping factor in hot star winds from a combined H_α , IR and radio analysis / J. Puls, N. Markova, S. Scuderi et al. // [A&A](#). — 2006. — Aug. — Vol. 454, no. 2. — P. 625–651. — astro-ph/0604372.
- [77] Metallicity in the Galactic Center: The Quintuplet Cluster / Francisco Najarro, Don F. Figer, D. John Hillier et al. // [ApJ](#). — 2009. — Feb. — Vol. 691, no. 2. — P. 1816–1827. — 0809.3185.

- [78] Najarro F., Hanson M. M., Puls J. L-band spectroscopy of Galactic OB-stars // [A&A](#). — 2011. — Nov. — Vol. 535. — P. A32. — 1108.5752.
- [79] Coupling hydrodynamics with comoving frame radiative transfer. I. A unified approach for OB and WR stars / A. A. C. Sander, W. R. Hamann, H. Todt et al. // [A&A](#). — 2017. — Jul. — Vol. 603. — P. A86. — 1704.08698.
- [80] New Hydrodynamic Solutions for Line-driven Winds of Hot Massive Stars Using the Lambert W-function / A. C. Gormaz-Matamala, M. Curé, D. J. Hillier et al. // [ApJ](#). — 2021. — Oct. — Vol. 920, no. 1. — P. 64. — 2106.15060.
- [81] Coupling hydrodynamics with comoving frame radiative transfer: III. The Wind Regime of Early-Type B Hypergiants / M. Bernini-Peron, A. A. C. Sander, F. Najarro et al. // [A&A](#). — 2025. — May. — Vol. 697. — P. A41. — 2504.03537.
- [82] Gräfener G., Hamann W. R. Hydrodynamic model atmospheres for WR stars. Self-consistent modeling of a WC star wind // [A&A](#). — 2005. — Mar. — Vol. 432, no. 2. — P. 633–645. — astro-ph/0410697.
- [83] Gräfener G., Hamann W. R. Mass loss from late-type WN stars and its Z-dependence. Very massive stars approaching the Eddington limit // [A&A](#). — 2008. — May. — Vol. 482, no. 3. — P. 945–960. — 0803.0866.
- [84] Bonnell I. A., Bate M. R. Accretion in stellar clusters and the collisional formation of massive stars // [MNRAS](#). — 2002. — Oct. — Vol. 336, no. 2. — P. 659–669.
- [85] Bonnell I. A., Bate M. R. Star formation through gravitational collapse and competitive accretion // [MNRAS](#). — 2006. — Jul. — Vol. 370, no. 1. — P. 488–494. — astro-ph/0604615.
- [86] Limiting Accretion onto Massive Stars by Fragmentation-induced Starvation / Thomas Peters, Ralf S. Klessen, Mordecai-Mark Mac Low, Robi Banerjee // [ApJ](#). — 2010. — Dec. — Vol. 725, no. 1. — P. 134–145. — 1005.3271.
- [87] Yorke H. W., Sonnhalter C. On the Formation of Massive Stars // [ApJ](#). — 2002. — Apr. — Vol. 569, no. 2. — P. 846–862. — astro-ph/0201041.

- [88] McKee C. F., Tan J. C. The Formation of Massive Stars from Turbulent Cores // [ApJ](#). — 2003. — Mar. — Vol. 585, no. 2. — P. 850–871. — astro-ph/0206037.
- [89] Krumholz M. R., McKee C. F. A minimum column density of 1gcm^{-2} for massive star formation // [Nature](#). — 2008. — Feb. — Vol. 451, no. 7182. — P. 1082–1084. — 0801.0442.
- [90] Zarriqueta Plaza M. S., Roman-Lopes A., Sanmartin D. Sapaki: Galactic O3If* star possibly born in isolation // [A&A](#). — 2023. — Jul. — Vol. 675. — P. A22. — 2305.11612.
- [91] The origin of very massive stars around NGC 3603 / V. M. Kalari, J. S. Vink, W. J. de Wit et al. // [A&A](#). — 2019. — May. — Vol. 625. — P. L2. — 1904.02126.
- [92] Selier R., Heydari-Malayeri M., Gouliermis D. A. An interesting candidate for isolated massive-star formation in the Small Magellanic Cloud // [A&A](#). — 2011. — May. — Vol. 529. — P. A40. — 1102.1257.
- [93] Massive runaway and walkaway stars. A study of the kinematical imprints of the physical processes governing the evolution and explosion of their binary progenitors / M. Renzo, E. Zapartas, S. E. de Mink et al. // [A&A](#). — 2019. — Apr. — Vol. 624. — P. A66. — 1804.09164.
- [94] Roberts M. S. The Numbers of Early-Type Stars in the Galaxy and Their Relation to Galactic Clusters and Associations // [PASP](#). — 1957. — Feb. — Vol. 69, no. 406. — P. 59.
- [95] Discovery of two new Galactic candidate luminous blue variables with Wide-field Infrared Survey Explorer / V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, A. S. Miroshnichenko et al. // [MNRAS](#). — 2012. — Apr. — Vol. 421, no. 4. — P. 3325–3337. — 1201.2854.
- [96] A Search for In Situ Field OB Star Formation in the Small Magellanic Cloud / Irene Vargas-Salazar, M. S. Oey, Jesse R. Barnes et al. // [ApJ](#). — 2020. — Nov. — Vol. 903, no. 1. — P. 42. — 2009.12379.

- [97] Oey M. S., King N. L., Parker J. W. Massive Field Stars and the Stellar Clustering Law // [AJ](#). — 2004. — Mar. — Vol. 127, no. 3. — P. 1632–1643. — astro-ph/0312051.
- [98] The Sparsest Clusters with O Stars / J. B. Lamb, M. S. Oey, J. K. Werk, L. D. Ingleby // [ApJ](#). — 2010. — Dec. — Vol. 725, no. 2. — P. 1886–1902. — 1010.5273.
- [99] Kraus M. A Census of B[e] Supergiants // [Galaxies](#). — 2019. — Sep. — Vol. 7, no. 4. — P. 83. — 1909.12199.
- [100] Blaauw A. On the origin of the O- and B-type stars with high velocities (the “run-away” stars), and some related problems // Bull. Astron. Inst. Netherlands. — 1961. — May. — Vol. 15. — P. 265.
- [101] Eldridge J. J., Langer N., Tout C. A. Runaway stars as progenitors of supernovae and gamma-ray bursts // [MNRAS](#). — 2011. — Jul. — Vol. 414, no. 4. — P. 3501–3520. — 1103.1877.
- [102] Poveda A., Ruiz J., Allen C. Run-away Stars as the Result of the Gravitational Collapse of Proto-stellar Clusters // Boletín de los Observatorios Tonantzintla y Tacubaya. — 1967. — Apr. — Vol. 4. — P. 86–90.
- [103] Gies D. R. The Kinematical and Binary Properties of Association and Field O Stars // [ApJS](#). — 1987. — Jul. — Vol. 64. — P. 545.
- [104] Stone R. C. The Space Frequency and Origin of the Runaway O and B Stars // [AJ](#). — 1991. — Jul. — Vol. 102. — P. 333.
- [105] Hoogerwerf R., de Bruijne J. H. J., de Zeeuw P. T. On the origin of the O and B-type stars with high velocities. II. Runaway stars and pulsars ejected from the nearby young stellar groups // [A&A](#). — 2001. — Jan. — Vol. 365. — P. 49–77. — astro-ph/0010057.
- [106] Oh S., Kroupa P. Dynamical ejections of massive stars from young star clusters under diverse initial conditions // [A&A](#). — 2016. — May. — Vol. 590. — P. A107. — 1604.00006.

- [107] Perets H. B., Šubr L. The Properties of Dynamically Ejected Runaway and Hyper-runaway Stars // [ApJ](#). — 2012. — Jun. — Vol. 751, no. 2. — P. 133. — 1202.2356.
- [108] Pflamm-Altenburg J., Kroupa P. The two-step ejection of massive stars and the issue of their formation in isolation // [MNRAS](#). — 2010. — May. — Vol. 404, no. 3. — P. 1564–1568. — 1001.3671.
- [109] Runaway OB Stars in the Small Magellanic Cloud: Dynamical versus Supernova Ejections / J. Dorigo Jones, M. S. Oey, K. Paggeot et al. // [ApJ](#). — 2020. — Nov. — Vol. 903, no. 1. — P. 43. — 2009.03571.
- [110] Multiplicity of Galactic luminous blue variable stars / L. Mahy, C. Lanthermann, D. Hutsemékers et al. // [A&A](#). — 2022. — Jan. — Vol. 657. — P. A4. — 2105.12380.
- [111] Southern Massive Stars at High Angular Resolution: Observational Campaign and Companion Detection / H. Sana, J. B. Le Bouquin, S. Lacour et al. // [ApJS](#). — 2014. — Nov. — Vol. 215, no. 1. — P. 15. — 1409.6304.
- [112] Blaauw A. Massive Runaway Stars // Massive Stars: Their Lives in the Interstellar Medium / Ed. by Joseph P. Cassinelli, Edward B. Churchwell. — Vol. 35 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 1993. — Jan. — P. 207.
- [113] Dallas M. M., Oey M. S., Castro N. Classical OBe Stars as Post-supernova Runaways: Confirming Binary Origins // [ApJ](#). — 2022. — Sep. — Vol. 936, no. 2. — P. 112. — 2208.10408.
- [114] Runaway OB Stars in the Small Magellanic Cloud. III. Updated Kinematics and Insights into Dynamical versus Supernova Ejections / Grant D. Phillips, M. S. Oey, Maria Cuevas et al. // [ApJ](#). — 2024. — May. — Vol. 966, no. 2. — P. 243. — 2403.17198.
- [115] [Dynamical vs Supernova Acceleration of OB Stars in the Small Magellanic Cloud](#) / M. S. Oey, J. Dorigo Jones, G. D. Phillips et al. // IAU Symposium / Ed. by Jonathan Mackey, Jorick S. Vink, Nicode St-Louis. — Vol. 361 of IAU Symposium. — 2024. — Jan. — P. 82–87.

- [116] The formation of Be stars through close binary evolution. / O. R. Pols, J. Cote, L. B. F. M. Waters, J. Heise // *A&A*. — 1991. — Jan. — Vol. 241. — P. 419.
- [117] Porter J. M., Rivinius T. Classical Be Stars // *PASP*. — 2003. — Oct. — Vol. 115, no. 812. — P. 1153–1170.
- [118] Luminous and Variable Stars in M31 and M33. IV. Luminous Blue Variables, Candidate LBVs, B[e] Supergiants, and the Warm Hypergiants: How to Tell Them Apart / R. M. Humphreys, M. S. Gordon, J. C. Martin et al. // *ApJ*. — 2017. — Feb. — Vol. 836. — P. 64. — 1611.07986.
- [119] Meynet G., Maeder A. Stellar evolution with rotation. X. Wolf-Rayet star populations at solar metallicity // *A&A*. — 2003. — Jun. — Vol. 404. — P. 975–990. — astro-ph/0304069.
- [120] The surface temperature of C/O-rich Wolf-Rayet stars / N. Langer, M. Kiriakidis, M. F. El Eid et al. // *A&A*. — 1988. — Mar. — Vol. 192, no. 1-2. — P. 177–181.
- [121] Crowther P. A. *Properties of Wolf-Rayet Stars* // Massive Stars as Cosmic Engines / Ed. by F. Bresolin, P. A. Crowther, J. Puls. — Vol. 250. — 2008. — Jun. — P. 47–62.
- [122] Subsonic structure and optically thick winds from Wolf-Rayet stars / L. Grassitelli, N. Langer, N. J. Grin et al. // *A&A*. — 2018. — Jun. — Vol. 614. — P. A86. — 1803.03033.
- [123] Shenar T., Hamann W. R., Todt H. The impact of rotation on the line profiles of Wolf-Rayet stars // *A&A*. — 2014. — Feb. — Vol. 562. — P. A118. — 1401.2159.
- [124] Hierarchical star formation in M33: fundamental properties of the star-forming regions / N. Bastian, B. Ercolano, M. Gieles et al. // *MNRAS*. — 2007. — Aug. — Vol. 379, no. 4. — P. 1302–1312. — 0706.0495.
- [125] Battinelli P. A new identification technique for OB associations : OB associations in the Small Magellanic Cloud. // *A&A*. — 1991. — Apr. — Vol. 244. — P. 69.

- [126] Ivanov G. R. OB associations in nearby galaxies. // *A&A*. — 1996. — Jan. — Vol. 305. — P. 708.
- [127] OB Stellar Associations in the Large Magellanic Cloud: Identification Method / D. Gouliermis, M. Kontizas, R. Korakitis et al. // *AJ*. — 2000. — Apr. — Vol. 119, no. 4. — P. 1737–1747.
- [128] A catalogue of OB associations in IC 1613 / J. Borissova, R. Kurtev, L. Georgiev, M. Rosado // *A&A*. — 2004. — Jan. — Vol. 413. — P. 889–893. — astro-ph/0310282.
- [129] Search for OB associations in Gaia Early Data Release 3 / Alexander A. Chemel, Richard de Grijs, Elena V. Glushkova, Andrey K. Dambis // *MNRAS*. — 2022. — Sep. — Vol. 515, no. 3. — P. 4359–4370. — 2206.12935.
- [130] A Survey of Local Group Galaxies Currently Forming Stars. I. UBVRI Photometry of Stars in M31 and M33 / Philip Massey, K. A. G. Olsen, Paul W. Hodge et al. // *AJ*. — 2006. — May. — Vol. 131, no. 5. — P. 2478–2496. — astro-ph/0602128.
- [131] Massey P., Neugent K. F., Smart B. M. A Spectroscopic Survey of Massive Stars in M31 and M33 // *AJ*. — 2016. — Sep. — Vol. 152, no. 3. — P. 62. — 1604.00112.
- [132] Hot, Luminous Stars in Selected Regions of NGC 6822, M31, and M33 / Philip Massey, Taft E. Armandroff, Randall Pyke et al. // *AJ*. — 1995. — Dec. — Vol. 110. — P. 2715.
- [133] Massive Stars in the Field and Associations of the Magellanic Clouds: The Upper Mass Limit, the Initial Mass Function, and a Critical Test of Main-Sequence Stellar Evolutionary Theory / Philip Massey, Cornelia C. Lang, Kathleen Degioia-Eastwood, Catharine D. Garmany // *ApJ*. — 1995. — Jan. — Vol. 438. — P. 188.
- [134] The evolution and star-formation history of M33 / Xiaoyu Kang, Ruixiang Chang, Jun Yin et al. // *MNRAS*. — 2012. — Oct. — Vol. 426, no. 2. — P. 1455–1464. — 1207.5280.

- [135] The Physical Properties and Effective Temperature Scale of O-Type Stars as a Function of Metallicity. II. Analysis of 20 More Magellanic Cloud Stars and Results from the Complete Sample / Philip Massey, Joachim Puls, A. W. A. Pauldrach et al. // [ApJ](#). — 2005. — Jul. — Vol. 627, no. 1. — P. 477–519. — astro-ph/0503464.
- [136] The Magellanic Clouds Photometric Survey: The Small Magellanic Cloud Stellar Catalog and Extinction Map / Dennis Zaritsky, Jason Harris, Ian B. Thompson et al. // [AJ](#). — 2002. — Feb. — Vol. 123, no. 2. — P. 855–872. — astro-ph/0110665.
- [137] The Magellanic Clouds Photometric Survey: The Large Magellanic Cloud Stellar Catalog and Extinction Map / Dennis Zaritsky, Jason Harris, Ian B. Thompson, Eva K. Grebel // [AJ](#). — 2004. — Oct. — Vol. 128, no. 4. — P. 1606–1614. — astro-ph/0407006.
- [138] Castelli F., Kurucz R. L. [New Grids of ATLAS9 Model Atmospheres](#) // Modelling of Stellar Atmospheres / Ed. by N. Piskunov, W. W. Weiss, D. F. Gray. — Vol. 210. — 2003. — Jan. — P. A20. — astro-ph/0405087.
- [139] Fitzpatrick E. L., Massa D. Determining the Physical Properties of the B Stars. II. Calibration of Synthetic Photometry // [AJ](#). — 2005. — Mar. — Vol. 129, no. 3. — P. 1642–1662. — astro-ph/0412542.
- [140] Martins F., Plez B. UBVJHK synthetic photometry of Galactic O stars // [A&A](#). — 2006. — Oct. — Vol. 457, no. 2. — P. 637–644. — astro-ph/0606587.
- [141] The Stellar Content of Two OB Associations in the LMC: LH 117 (NGC 2122) and LH 118 / Philip Massey, Catharine D. Garmany, Mariabeth Silkey, Kathleen Degioia-Eastwood // [AJ](#). — 1989. — Jan. — Vol. 97. — P. 107.
- [142] Dust Extinction Law in Nearby Star-resolved Galaxies. II. M33 Traced by Supergiants / Yuxi Wang, Jian Gao, Yi Ren, Bingqiu Chen // [ApJS](#). — 2022. — Jun. — Vol. 260, no. 2. — P. 41. — 2204.05548.
- [143] Fitzgerald M. P. The Intrinsic Colours of Stars and Two-Colour Reddening Lines // [A&A](#). — 1970. — Feb. — Vol. 4. — P. 234.

- [144] Fitzpatrick E. L. The Properties of OB Supergiants in the Large Magellanic Cloud. II. Spectral Types and Intrinsic Colors // [ApJ](#). — 1988. — Dec. — Vol. 335. — P. 703.
- [145] A Survey of Local Group Galaxies Currently Forming Stars. III. A Search for Luminous Blue Variables and Other H α Emission-Line Stars / Philip Massey, Reagin T. McNeill, K. A. G. Olsen et al. // [AJ](#). — 2007. — Dec. — Vol. 134, no. 6. — P. 2474–2503. — 0709.1267.
- [146] Bertin E., Arnouts S. SExtractor: Software for source extraction. // [A&AS](#). — 1996. — Jun. — Vol. 117. — P. 393–404.
- [147] Flower P. J. Transformations from Theoretical H-R Diagrams to C-M Diagrams // [A&A](#). — 1977. — Jan. — Vol. 54. — P. 31.
- [148] Straizys V., Kuriliene G. Fundamental Stellar Parameters Derived from the Evolutionary Tracks // [Ap&SS](#). — 1981. — Dec. — Vol. 80, no. 2. — P. 353–368.
- [149] Neugent K. F., Massey P. The Wolf-Rayet Content of M33 // [ApJ](#). — 2011. — Jun. — Vol. 733, no. 2. — P. 123. — 1103.5549.
- [150] Valeev A. F., Sholukhova O., Fabrika S. A new luminous variable in M33 // [MNRAS](#). — 2009. — Jun. — Vol. 396, no. 1. — P. L21–L25. — 0903.5222.
- [151] Luminous and Variable Stars in M31 and M33. II. Luminous Blue Variables, Candidate LBVs, Fe II Emission Line Stars, and Other Supergiants / Roberta M. Humphreys, Kerstin Weis, Kris Davidson et al. // [ApJ](#). — 2014. — Jul. — Vol. 790, no. 1. — P. 48. — 1407.2259.
- [152] A New LBV Candidate in M33 / John C. Martin, Roberta M. Humphreys, Kerstin Weis, Dominik J. Bomans // [Research Notes of the American Astronomical Society](#). — 2023. — May. — Vol. 7, no. 5. — P. 96. — 2305.11687.
- [153] Massey P., Conti P. S. Wolf-rayet stars in M 33. // [ApJ](#). — 1983. — Oct. — Vol. 273. — P. 576–589.
- [154] Schmeja S. Identifying star clusters in a field: A comparison of different algorithms // [Astronomische Nachrichten](#). — 2011. — Feb. — Vol. 332, no. 2. — P. 172. — 1011.5533.

- [155] Low-mass young stars in the Milky Way unveiled by DBSCAN and Gaia EDR3: Mapping the star forming regions within 1.5 kpc / L. Prisinzano, F. Damiani, S. Sciortino et al. // [A&A](#). — 2022. — Aug. — Vol. 664. — P. A175. — 2206.00249.
- [156] The second set of pulsar discoveries by CHIME/FRB/Pulsar: 14 rotating radio transients and 7 pulsars / Fengqiu Adam Dong, Kathryn Crowter, Bradley W. Meyers et al. // [MNRAS](#). — 2023. — Oct. — Vol. 524, no. 4. — P. 5132–5147. — 2210.09172.
- [157] Gao X., Fang D. A clustering study of the old open cluster Trumpler 19 // [Ap&SS](#). — 2023. — Sep. — Vol. 368, no. 9. — P. 73.
- [158] Alfonso J., García-Varela A. A Gaia astrometric view of the open clusters Pleiades, Praesepe, and Blanco 1 // [A&A](#). — 2023. — Sep. — Vol. 677. — P. A163. — 2304.00164.
- [159] Campello R. J. G. B., Moulavi D., Sander J. Density-based clustering based on hierarchical density estimates // *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining* / Ed. by Jian Pei, Vincent S. Tseng, Longbing Cao et al. — Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013. — P. 160–172.
- [160] Optics: ordering points to identify the clustering structure / Mihael Ankerst, Markus M. Breunig, Hans-Peter Kriegel, Jörg Sander // [SIGMOD Rec.](#) — 1999. — jun. — Vol. 28, no. 2. — P. 49–60. — URL: <https://doi.org/10.1145/304181.304187>.
- [161] Zinnecker H., Yorke H. W. Toward Understanding Massive Star Formation // [ARA&A](#). — 2007. — Sep. — Vol. 45, no. 1. — P. 481–563. — 0707.1279.
- [162] [Massive Star Formation](#) / J. C. Tan, M. T. Beltrán, P. Caselli et al. // *Protostars and Planets VI* / Ed. by Henrik Beuther, Ralf S. Klessen, Cornelis P. Dullemond, Thomas Henning. — 2014. — Jan. — P. 149–172. — 1402.0919.
- [163] Kroupa P., Aarseth S., Hurley J. The formation of a bound star cluster: from the Orion nebula cluster to the Pleiades // [MNRAS](#). — 2001. — Mar. — Vol. 321, no. 4. — P. 699–712. — astro-ph/0009470.

- [164] Pfalzner S. Universality of young cluster sequences // [A&A](#). — 2009. — May. — Vol. 498, no. 2. — P. L37–L40. — 0904.0523.
- [165] Efremov Y. N. Star Complexes and Associations: Fundamental and Elementary Cells of Star Formation // [AJ](#). — 1995. — Dec. — Vol. 110. — P. 2757.
- [166] Elmegreen B. G. Star Formation in a Crossing Time // [ApJ](#). — 2000. — Feb. — Vol. 530, no. 1. — P. 277–281. — astro-ph/9911172.
- [167] The Extragalactic Distance Database: Color-Magnitude Diagrams / Bradley A. Jacobs, Luca Rizzi, R. Brent Tully et al. // [AJ](#). — 2009. — Aug. — Vol. 138, no. 2. — P. 332–337. — 0902.3675.
- [168] Gvaramadze V. V., Bomans D. J. Search for OB stars running away from young star clusters. I. NGC 6611 // [A&A](#). — 2008. — Nov. — Vol. 490, no. 3. — P. 1071–1077. — 0809.0650.
- [169] A Catalog of Early-type Runaway Stars from LAMOST DR8 / Yanjun Guo, Luqian Wang, Chao Liu et al. // [ApJS](#). — 2024. — Jun. — Vol. 272, no. 2. — P. 45. — 2405.04750.
- [170] Salpeter E. E. The Luminosity Function and Stellar Evolution. // [ApJ](#). — 1955. — Jan. — Vol. 121. — P. 161.
- [171] A new synthetic model for asymptotic giant branch stars / Robert G. Izzard, Christopher A. Tout, Amanda I. Karakas, Onno R. Pols // [MNRAS](#). — 2004. — May. — Vol. 350, no. 2. — P. 407–426. — astro-ph/0402403.
- [172] Population nucleosynthesis in single and binary stars. I. Model / R. G. Izzard, L. M. Dray, A. I. Karakas et al. // [A&A](#). — 2006. — Dec. — Vol. 460, no. 2. — P. 565–572.
- [173] Population synthesis of binary carbon-enhanced metal-poor stars / R. G. Izzard, E. Glebbeek, R. J. Stancliffe, O. R. Pols // [A&A](#). — 2009. — Dec. — Vol. 508, no. 3. — P. 1359–1374. — 0910.2158.
- [174] Elmegreen B. G., Efremov Y. N. A Universal Formation Mechanism for Open and Globular Clusters in Turbulent Gas // [ApJ](#). — 1997. — May. — Vol. 480, no. 1. — P. 235–245.

- [175] Humphreys R. M., Sandage A. On the stellar content and structure of the spiral galaxy M33. // [ApJS](#). — 1980. — Nov. — Vol. 44. — P. 319–381.
- [176] Ivanov G. R. The Stellar Content of Associations and Star Complexes in M33 // [Ap&SS](#). — 1991. — Apr. — Vol. 178, no. 2. — P. 227–249.
- [177] Hodge P. The stellar associations of the Small Magellanic Cloud. // [PASP](#). — 1985. — Jun. — Vol. 97. — P. 530–536.
- [178] Efremov I. N., Ivanov G. R., Nikolov N. S. Star Complexes and Associations in the Andromeda Galaxy // [Ap&SS](#). — 1987. — Jul. — Vol. 135, no. 1. — P. 119–130.
- [179] Ivanov G. R. Stellar Associations and Complexes in M33 // [Ap&SS](#). — 1987. — Aug. — Vol. 136, no. 1. — P. 113–128.
- [180] Automated identification of OB associations in M 31. / Eugene A. Magnier, Paolo Battinelli, Walter H. G. Lewin et al. // [A&A](#). — 1993. — Oct. — Vol. 278. — P. 36–42.
- [181] The Red Supergiant Content of M31 and M33 / Philip Massey, Kathryn F. Neugent, Emily M. Levesque et al. // [AJ](#). — 2021. — Feb. — Vol. 161, no. 2. — P. 79. — 2011.13279.
- [182] Efron B. Bootstrap methods: Another look at the jackknife // The Annals of Statistics. — 1979. — Vol. 7, no. 1. — P. 1–26. — URL: <http://www.jstor.org/stable/2958830> (online; accessed: 2025-08-29).
- [183] On the nature of candidate luminous blue variables in M 33 / J. S. Clark, N. Castro, M. Garcia et al. // [A&A](#). — 2012. — May. — Vol. 541. — P. A146. — 1202.4409.
- [184] A 10-h period revealed in optical spectra of the highly variable WN8 Wolf-Rayet star WR 123 / A. N. Chené, C. Foellmi, S. V. Marchenko et al. // [A&A](#). — 2011. — Jun. — Vol. 530. — P. A151. — 1104.5182.
- [185] The History Goes On: Century Long Study of Romano’s Star / Olga Maryeva, Roberto F. Viotti, Gloria Koenigsberger et al. // [Galaxies](#). — 2019. — Sep. — Vol. 7, no. 3. — P. 79. — 1909.08765.

- [186] Moffat A. F. J. Wolf-Rayet Stars in the Magellanic Clouds. VII. Spectroscopic Binary Search among the WNL Stars and the WN6/7–WN8/9 Dichotomy // [ApJ](#). — 1989. — Dec. — Vol. 347. — P. 373.
- [187] Foellmi C., Moffat A. F. J. [Are Peculiar Wolf-Rayet Stars of Type WN8 Thorne-Zytkow Objects?](#) // Stellar Collisions, Mergers and their Consequences / Ed. by Michael M. Shara. — Vol. 263 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 2002. — Jan. — P. 123. — [astro-ph/0607217](#).
- [188] Wright N. J. OB Associations and their origins // [New A Rev.](#). — 2020. — Nov. — Vol. 90. — P. 101549. — 2011.09483.
- [189] Moeckel N., Bate M. R. On the evolution of a star cluster and its multiple stellar systems following gas dispersal // [MNRAS](#). — 2010. — May. — Vol. 404, no. 2. — P. 721–737. — 1001.3417.
- [190] Dynamics of massive stellar black holes in young star clusters and the displacement of ultra-luminous X-ray sources / M. Mapelli, E. Ripamonti, L. Zampieri, M. Colpi // [MNRAS](#). — 2011. — Sep. — Vol. 416, no. 3. — P. 1756–1763. — 1105.0681.
- [191] Multiwavelength Characterization of the High-mass X-Ray Binary Population of M33 / Margaret Lazzarini, Kyros Hinton, Cheyanne Shariat et al. // [ApJ](#). — 2023. — Aug. — Vol. 952, no. 2. — P. 114. — 2305.16390.
- [192] The spatial correlation of high-mass X-ray binaries and young star clusters in nearby star-forming galaxies / Breanna A. Binder, Ashley K. Anderson, Kristen Garofali et al. // [MNRAS](#). — 2023. — Jul. — Vol. 522, no. 4. — P. 5669–5679. — 2305.01802.
- [193] On the association of the ultraluminous X-ray sources in the Antennae galaxies with young stellar clusters / Juri Poutanen, Sergei Fabrika, Azamat F. Valeev et al. // [MNRAS](#). — 2013. — Jun. — Vol. 432, no. 1. — P. 506–519. — 1210.1210.
- [194] Modeling of Extended Atmospheres with Temperatures below 40000 K / A. Kostenkov, A. Vinokurov, Y. Solovyeva et al. // [Astrophysical Bulletin](#). — 2020. — Apr. — Vol. 75, no. 2. — P. 182–190. — 2007.02406.

- [195] [Wind parameters of the new LBV in NGC1156](#) / Y. N. Solovyeva, A. Kostenkov, E. Dedov, A. Vinokurov // The Multifaceted Universe: Theory and Observations - 2000. — 2022. — Dec. — P. 49. — 2209.06012.
- [196] Dwarkadas V. V., Owocki S. P. Radiatively Driven Winds and the Shaping of Bipolar Luminous Blue Variable Nebulae // [ApJ](#). — 2002. — Dec. — Vol. 581, no. 2. — P. 1337–1343.
- [197] MN112: a new Galactic candidate luminous blue variable / V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, S. Fabrika et al. // [MNRAS](#). — 2010. — Jun. — Vol. 405. — P. 520–524. — 0912.5080.
- [198] Lamers H. J. G. L. M., de Groot M. J. H. Observed evolutionary changes in the visual magnitude of the luminous blue variable P Cygni // [A&A](#). — 1992. — Apr. — Vol. 257. — P. 153–162.
- [199] The Spatially Resolved H α -emitting Wind Structure of P Cygni / A. Balan, C. Tycner, R. T. Zavala et al. // [AJ](#). — 2010. — Jun. — Vol. 139. — P. 2269–2278. — 1004.0376.
- [200] Najarro F. Spectroscopy of P Cygni // P Cygni 2000: 400 Years of Progress / Ed. by M. de Groot, C. Sterken. — Vol. 233 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — 2001. — Jun. — P. 133.
- [201] Lamers H. J. G. L. M., de Groot M., Cassatella A. The distance, temperature, and luminosity of the hypergiant P Cygni (B1 IA +) // [A&A](#). — 1983. — Dec. — Vol. 128. — P. 299–310.
- [202] Forbidden emission lines in the spectrum of P Cygni / O. Stahl, H. Mandel, T. Szeifert et al. // [A&A](#). — 1991. — Apr. — Vol. 244. — P. 467–469.
- [203] The ISO-SWS spectrum of P Cygni. / H. J. G. L. M. Lamers, F. Najarro, R. P. Kudritzki et al. // [A&A](#). — 1996. — Nov. — Vol. 315. — P. L229–L232.
- [204] [Mass producing an efficient NIR spectrograph](#) / J. C. Wilson, C. P. Henderson, T. L. Herter et al. // Ground-based Instrumentation for Astronomy / Ed. by A. F. M. Moorwood, M. Iye. — Vol. 5492 of Proc. SPIE. — 2004. — Sep. — P. 1295–1305.

- [205] Afanasiev V. L., Moiseev A. V. The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope // [Astronomy Letters](#). — 2005. — Mar. — Vol. 31. — P. 194–204. — astro-ph/0502095.
- [206] Hillier D. J. WC stars - Hot stars with cold winds // [ApJ](#). — 1989. — Dec. — Vol. 347. — P. 392–408.
- [207] Hillier D. J. The effects of electron scattering and wind clumping for early emission line stars. // [A&A](#). — 1991. — Jul. — Vol. 247. — P. 455.
- [208] Groh J. H., Vink J. S. The bi-stability jump as the origin for multiple P-Cygni absorption components in luminous blue variables // [A&A](#). — 2011. — Jul. — Vol. 531. — P. L10. — 1106.3007.
- [209] The ISO-SWS Spectrum of P Cygni / F. Najarro, R. P. Kudritzki, D. J. Hillier et al. // Luminous Blue Variables: Massive Stars in Transition / Ed. by Antonella Nota, Henney Lamers. — 1997. — Vol. 120 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — P. 105.
- [210] Clumping in O-type Supergiants / J. C. Bouret, T. Lanz, D. J. Hillier, C. Foellmi // Clumping in Hot-Star Winds / Ed. by Wolf-Rainer Hamann, Achim Feldmeier, Lidia M. Oskinova. — 2008. — Apr. — P. 31.
- [211] Mass loss from inhomogeneous hot star winds. II. Constraints from a combined optical/UV study / J. O. Sundqvist, J. Puls, A. Feldmeier, S. P. Owocki // [A&A](#). — 2011. — Apr. — Vol. 528. — P. A64. — 1101.5293.
- [212] Fitzpatrick E. L. Correcting for the Effects of Interstellar Extinction // [PASP](#). — 1999. — Jan. — Vol. 111, no. 755. — P. 63–75. — astro-ph/9809387.
- [213] Plausible Home Stars of the Interstellar Object Oumuamua Found in Gaia DR2 / C. A. L. Bailer-Jones, D. Farnocchia, K. J. Meech et al. // [AJ](#). — 2018. — Nov. — Vol. 156. — P. 205. — 1809.09009.
- [214] Tracing back the evolution of the candidate LBV HD 168625 / L. Mahy, D. Hutsemékers, P. Royer, C. Waelkens // [A&A](#). — 2016. — Oct. — Vol. 594. — P. A94. — 1608.01087.

- [215] Kaaret P., Feng H., Roberts T. P. Ultraluminous X-Ray Sources // [ARA&A](#). — 2017. — Aug. — Vol. 55, no. 1. — P. 303–341. — 1703.10728.
- [216] Supercritical accretion disks in ultraluminous X-ray sources and SS 433 / Sergei Fabrika, Yoshihiro Ueda, Alexander Vinokurov et al. // [Nature Physics](#). — 2015. — Jul. — Vol. 11, no. 7. — P. 551–553. — 1512.00435.
- [217] Maryeva O., Abolmasov P. Spectral Variability of Romano’s Star // arXiv e-prints. — 2010. — Jun. — P. arXiv:1006.1068. — 1006.1068.
- [218] VizieR Online Data Catalog: Variable stars in M31 & M33. II. LBVs (Humphreys+, 2014) / R. M. Humphreys, K. Weis, K. Davidson et al. // VizieR Online Data Catalog. — 2016. — Aug. — P. J/ApJ/790/48.
- [219] Schmutz W. [Quantitative Spectroscopy of Wolf-Rayet Stars](#) // IAU Colloq. 108: Atmospheric Diagnostics of Stellar Evolution / Ed. by Ken’ichi Nomoto. — 1988. — Vol. 305. — P. 133.
- [220] Intensity interferometry of P Cygni in the H α emission line: towards distance calibration of LBV supergiant stars / J. P. Rivet, A. Siciak, E. S. G. de Almeida et al. // arXiv e-prints. — 2019. — Oct. — P. arXiv:1910.08366. — 1910.08366.
- [221] Kniazev A. Y., Gvaramadze V. V., Berdnikov L. N. WS1: one more new Galactic bona fide luminous blue variable. // [MNRAS](#). — 2015. — Apr. — Vol. 449. — P. L60–L64. — 1502.07361.
- [222] Cosmicflows-2: The Data / R. Brent Tully, Hélène M. Courtois, Andrew E. Dolphin et al. // [AJ](#). — 2013. — Oct. — Vol. 146, no. 4. — P. 86. — 1307.7213.
- [223] Compact Optical Counterparts of Ultraluminous X-Ray Sources / Lian Tao, Hua Feng, Fabien Grisé, Philip Kaaret // [ApJ](#). — 2011. — Aug. — Vol. 737, no. 2. — P. 81. — 1106.0315.
- [224] Vinokurov A., Fabrika S., Atapin K. Optical Counterparts of Ultraluminous X-Ray Sources NGC 4559 X-10 and NGC 4395 ULX-1 // [ApJ](#). — 2018. — Feb. — Vol. 854, no. 2. — P. 176.

- [225] New predictions for radiation-driven, steady-state mass-loss and wind-momentum from hot, massive stars. I. Method and first results / J. O. Sundqvist, R. Björklund, J. Puls, F. Najarro // [A&A](#). — 2019. — Dec. — Vol. 632. — P. A126. — 1910.06586.
- [226] Near-Eddington mass loss of hydrogen-rich Wolf-Rayet stars: Consequences of continuum acceleration, metallicity, and temperature / R. R. Lefever, A. A. C. Sander, M. Bernini-Peron et al. // [A&A](#). — 2025. — Aug. — Vol. 700. — P. A2. — 2506.13582.
- [227] The Nature of the UV/Optical Emission of the Ultraluminous X-Ray Source in Holmberg II / Lian Tao, Philip Kaaret, Hua Feng, Fabien Grisé // [ApJ](#). — 2012. — May. — Vol. 750, no. 2. — P. 110. — 1203.1086.
- [228] Pinto C., Middleton M. J., Fabian A. C. Resolved atomic lines reveal outflows in two ultraluminous X-ray sources // [Nature](#). — 2016. — May. — Vol. 533, no. 7601. — P. 64–67. — 1604.08593.
- [229] Ultrafast outflows in ultraluminous X-ray sources / C. Pinto, A. Fabian, M. Middleton, D. Walton // [Astronomische Nachrichten](#). — 2017. — Mar. — Vol. 338, no. 234. — P. 234–240. — 1611.00623.
- [230] Thermal stability of winds driven by radiation pressure in super-Eddington accretion discs / C. Pinto, M. Mehdipour, D. J. Walton et al. // [MNRAS](#). — 2020. — Feb. — Vol. 491, no. 4. — P. 5702–5716. — 1903.06174.
- [231] Comptonized Photon Spectra of Supercritical Black Hole Accretion Flows with Application to Ultraluminous X-Ray Sources / T. Kawashima, K. Ohsuga, S. Mineshige et al. // [ApJ](#). — 2012. — Jun. — Vol. 752, no. 1. — P. 18.
- [232] Richardson N. D., Mehner A. The 2018 Census of Luminous Blue Variables in the Local Group // [Research Notes of the American Astronomical Society](#). — 2018. — Jul. — Vol. 2, no. 3. — P. 121. — 1807.04262.
- [233] Duncan J. C. Three Variable Stars and Suspected Nova in the Spiral Nebula M 33 Trianguli // [PASP](#). — 1922. — Oct. — Vol. 34, no. 201. — P. 290.

- [234] Wolf M. Zwei neue veränderliche. // *Astronomische Nachrichten*. — 1922. — Vol. 217, no. 24. — P. 475–476. — <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/asna.19222172406>.
- [235] Hubble E., Sandage A. The Brightest Variable Stars in Extragalactic Nebulae. I. M31 and M33. // *ApJ*. — 1953. — Nov. — Vol. 118. — P. 353.
- [236] Humphreys R. M. The spectra of AE Andromedae and the Hubble-Sandage variables in M31 and M33. // *ApJ*. — 1975. — Sep. — Vol. 200. — P. 426–429.
- [237] Humphreys R. M. Luminous variable stars in M31 and M33. // *ApJ*. — 1978. — Jan. — Vol. 219. — P. 445–451.
- [238] Kurtev R. G., Corral L. J., Georgiev L. Photometric variability of LBV-candidate stars and Hubble-Sandage variables A, B, C and 2 in M 33 // *A&A*. — 1999. — Sep. — Vol. 349. — P. 796–800.
- [239] Martin J. C., Humphreys R. M. Multi-epoch BVRI Photometry of Luminous Stars in M31 and M33 // *AJ*. — 2017. — Sep. — Vol. 154, no. 3. — P. 81. — 1707.01552.
- [240] On the Spatial Distribution of Luminous Blue Variables in the Galaxy M33 / A. Kostenkov, S. Fabrika, A. Kaldybekova et al. // *Research in Astronomy and Astrophysics*. — 2025. — Apr. — Vol. 25, no. 4. — P. 045001. — 2503.16349.
- [241] Burggraf B., Weis K., Bomans D. J. *The Environment of LBVs in M33* // The Evolution of Starbursts / Ed. by Susanne Hüttmeister, Eva Manthey, Dominik Bomans, Kerstin Weis. — Vol. 783 of American Institute of Physics Conference Series. — AIP, 2005. — Aug. — P. 33–36.
- [242] SPEXTRA: Optimal extraction code for long-slit spectra in crowded fields / A. N. Sarkisyan, A. S. Vinokurov, Y. N. Solovieva et al. // *Astrophysical Bulletin*. — 2017. — Oct. — Vol. 72. — P. 486–501.
- [243] Periods, period changes and the nature of the microvariations of Luminous Blue Variables / H. J. G. L. M. Lamers, M. V. Bastiaanse, C. Aerts, H. W. W. Spoon // *A&A*. — 1998. — Jul. — Vol. 335. — P. 605–621.

- [244] Var C: Long-term photometric and spectral variability of a luminous blue variable in M 33 / B. Burggraf, K. Weis, D. J. Bomans et al. // [A&A](#). — 2015. — Sep. — Vol. 581. — P. A12. — 1505.07327.
- [245] Skiff B. A. VizieR Online Data Catalog: Catalogue of Stellar Spectral Classifications (Skiff, 2009-). — VizieR On-line Data Catalog: B/mk. Originally published in: Lowell Observatory (October 2014). — 2014. — Oct.
- [246] The ELODIE Archive / J. Moulataka, S. A. Ilovaisky, P. Prugniel, C. Soubiran // [PASP](#). — 2004. — Jul. — Vol. 116, no. 821. — P. 693–698. — astro-ph/0405025.
- [247] The Zwicky Transient Facility: System Overview, Performance, and First Results / Eric C. Bellm, Shrinivas R. Kulkarni, Matthew J. Graham et al. // [PASP](#). — 2019. — Jan. — Vol. 131, no. 995. — P. 018002. — 1902.01932.
- [248] The Zwicky Transient Facility: Data Processing, Products, and Archive / Frank J. Masci, Russ R. Laher, Ben Rusholme et al. // [PASP](#). — 2019. — Jan. — Vol. 131, no. 995. — P. 018003. — 1902.01872.
- [249] Guzik J. A., Kloppenborg B., Jackiewicz J. Deneb and the α Cygni Variables // [Society for Astronomical Sciences Annual Symposium](#). — 2024. — Jun. — Vol. 43. — P. 145–153. — 2410.23985.
- [250] Hillier D. J., Miller D. L. The Treatment of Non-LTE Line Blanketing in Spherically Expanding Outflows // [ApJ](#). — 1998. — Mar. — Vol. 496, no. 1. — P. 407–427.
- [251] Calzetti D., Kinney A. L., Storchi-Bergmann T. Dust Extinction of the Stellar Continua in Starburst Galaxies: The Ultraviolet and Optical Extinction Law // [ApJ](#). — 1994. — Jul. — Vol. 429. — P. 582.
- [252] Hot, Luminous Stars in Selected Regions of NGC 6822, M31, and M33 / Philip Massey, Taft E. Armandroff, Randall Pyke et al. // [AJ](#). — 1995. — Dec. — Vol. 110. — P. 2715.
- [253] Vink J. S. Fast and slow winds from supergiants and luminous blue variables // [A&A](#). — 2018. — Nov. — Vol. 619. — P. A54. — 1808.06612.

- [254] O-star mass-loss and wind momentum rates in the Galaxy and the Magellanic Clouds Observations and theoretical predictions. / J. Puls, R. P. Kudritzki, A. Herrero et al. // *A&A*. — 1996. — Jan. — Vol. 305. — P. 171.
- [255] Predictions for mass-loss rates and terminal wind velocities of massive O-type stars / L. E. Muijres, Jorick S. Vink, A. de Koter et al. // *A&A*. — 2012. — Jan. — Vol. 537. — P. A37. — 1112.0944.
- [256] Nugis T., Crowther P. A., Willis A. J. Clumping-corrected mass-loss rates of Wolf-Rayet stars // *A&A*. — 1998. — May. — Vol. 333. — P. 956–969.
- [257] Empirical mass-loss rates and clumping properties of Galactic early-type O supergiants / C. Hawcroft, H. Sana, L. Mahy et al. // *A&A*. — 2021. — Nov. — Vol. 655. — P. A67. — 2108.08340.
- [258] Rübke K., Herrero A., Puls J. To clump or not to clump. The impact of wind inhomogeneities on the optical and NIR spectroscopic analysis of massive OB stars // *A&A*. — 2023. — Nov. — Vol. 679. — P. A19. — 2309.10615.
- [259] Runacres M. C., Owocki S. P. The outer evolution of instability-generated structure in radiatively driven stellar winds // *A&A*. — 2002. — Jan. — Vol. 381. — P. 1015–1025.
- [260] Sundqvist J. O., Owocki S. P. Clumping in the inner winds of hot, massive stars from hydrodynamical line-driven instability simulations // *MNRAS*. — 2013. — Jan. — Vol. 428, no. 2. — P. 1837–1844. — 1210.1861.
- [261] Prinja R. K., Massa D. L. Ultraviolet diagnostic of porosity-free mass-loss estimates in B stars // *A&A*. — 2013. — Nov. — Vol. 559. — P. A15. — 1309.2095.
- [262] X-Shooting ULLYSES: Massive Stars at low metallicity: IX. Empirical constraints on mass-loss rates and clumping parameters for OB supergiants in the Large Magellanic Cloud / O. Verhamme, J. Sundqvist, A. de Koter et al. // *A&A*. — 2024. — Dec. — Vol. 692. — P. A91. — 2410.14937.
- [263] Puls J., Vink J. S., Najarro F. Mass loss from hot massive stars // *A&A Rev.* — 2008. — Dec. — Vol. 16, no. 3-4. — P. 209–325. — 0811.0487.

- [264] Kr̥t̥i̥čka J., Kubát J. Comoving frame models of hot star winds. II. Reduction of O star wind mass-loss rates in global models // [A&A](#). — 2017. — Oct. — Vol. 606. — P. A31. — 1706.06194.
- [265] Massive stars in the Small Magellanic Cloud. Evolution, rotation, and surface abundances / J. C. Bouret, F. Martins, D. J. Hillier et al. // [A&A](#). — 2021. — Mar. — Vol. 647. — P. A134. — 2101.09269.
- [266] Quantitative Spectroscopy of O Stars at Low Metallicity: O Dwarfs in NGC 346 / J. C. Bouret, T. Lanz, D. J. Hillier et al. // [ApJ](#). — 2003. — Oct. — Vol. 595, no. 2. — P. 1182–1205. — astro-ph/0301454.
- [267] Bouret J. C., Lanz T., Hillier D. J. Lower mass loss rates in O-type stars: Spectral signatures of dense clumps in the wind of two Galactic O4 stars // [A&A](#). — 2005. — Jul. — Vol. 438, no. 1. — P. 301–316. — astro-ph/0412346.
- [268] A Tale of Two Stars: The Extreme O7 Iaf+ Supergiant AV 83 and the OC7.5 III((f)) star AV 69 / D. John Hillier, T. Lanz, S. R. Heap et al. // [ApJ](#). — 2003. — May. — Vol. 588, no. 2. — P. 1039–1063.
- [269] X-Shooting ULLYSES: Massive stars at low metallicity: VII. Stellar and wind properties of B supergiants in the Small Magellanic Cloud / M. Bernini-Peron, A. A. C. Sander, V. Ramachandran et al. // [A&A](#). — 2024. — Dec. — Vol. 692. — P. A89. — 2407.14216.
- [270] Optical spectroscopy of the blue supergiant Sk-69° 279 and its circumstellar shell with SALT / V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, O. V. Maryeva, L. N. Berdnikov // [MNRAS](#). — 2018. — Feb. — Vol. 474, no. 1. — P. 1412–1425. — 1711.00874.
- [271] On the sensitivity of He I singlet lines to the Fe IV model atom in O stars / F. Najarro, D. J. Hillier, J. Puls et al. // [A&A](#). — 2006. — Sep. — Vol. 456, no. 2. — P. 659–664. — astro-ph/0605211.
- [272] Understanding B-type supergiants in the low metallicity environment of the SMC / C. Trundle, D. J. Lennon, J. Puls, P. L. Dufton // [A&A](#). — 2004. — Apr. — Vol. 417. — P. 217–234. — astro-ph/0312233.

- [273] Crowther P. A., Lennon D. J., Walborn N. R. Physical parameters and wind properties of galactic early B supergiants // [A&A](#). — 2006. — Jan. — Vol. 446, no. 1. — P. 279–293. — astro-ph/0509436.
- [274] Markova N., Puls J. Bright OB stars in the Galaxy. IV. Stellar and wind parameters of early to late B supergiants // [A&A](#). — 2008. — Feb. — Vol. 478, no. 3. — P. 823–842. — 0711.1110.
- [275] Smith K. C., Howarth I. D. Microturbulence in O supergiants // [MNRAS](#). — 1998. — Oct. — Vol. 299, no. 4. — P. 1146–1158.
- [276] Revised Stellar Temperatures for Magellanic Cloud O Supergiants from Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer and Very Large Telescope UV-Visual Echelle Spectrograph Spectroscopy / P. A. Crowther, D. J. Hillier, C. J. Evans et al. // [ApJ](#). — 2002. — Nov. — Vol. 579, no. 2. — P. 774–799. — astro-ph/0206257.
- [277] Petrov B., Vink J. S., Gräfener G. Two bi-stability jumps in theoretical wind models for massive stars and the implications for luminous blue variable supernovae // [MNRAS](#). — 2016. — May. — Vol. 458, no. 2. — P. 1999–2011. — 1602.05868.
- [278] Prinja R. K., Massa D. L. Signature of wide-spread clumping in B supergiant winds // [A&A](#). — 2010. — Oct. — Vol. 521. — P. L55. — 1007.2744.
- [279] Petrov B., Vink J. S., Gräfener G. On the H α behaviour of blue supergiants: rise and fall over the bi-stability jump // [A&A](#). — 2014. — May. — Vol. 565. — P. A62. — 1403.4097.
- [280] Properties of Galactic early-type O-supergiants. A combined FUV-UV and optical analysis / J.-C. Bouret, D. J. Hillier, T. Lanz, A. W. Fullerton // [A&A](#). — 2012. — Aug. — Vol. 544. — P. A67. — 1205.3075.
- [281] Parker E. N. Dynamical Properties of Stellar Coronas and Stellar Winds. I. Integration of the Momentum Equation. // [ApJ](#). — 1964. — Jan. — Vol. 139. — P. 72.
- [282] Lamers H. J. G. L. M., Cassinelli J. P. Introduction to Stellar Winds. — 1999.

- [283] Dormand J., Prince P. A family of embedded runge-kutta formulae // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. — 1980. — Vol. 6, no. 1. — P. 19–26. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0771050X80900133>.
- [284] Lamers H. J. G. L. M., Snow T. P., Lindholm D. M. Terminal Velocities and the Bistability of Stellar Winds // *ApJ*. — 1995. — Dec. — Vol. 455. — P. 269.
- [285] Lamers H. J. G. L. M., Nugis T. An explanation for the curious mass loss history of massive stars: From OB stars, through Luminous Blue Variables to Wolf-Rayet stars // *A&A*. — 2002. — Nov. — Vol. 395. — P. L1–L4. — astro-ph/0210388.
- [286] Wind modelling of very massive stars up to 300 solar masses / Jorick S. Vink, L. E. Muijres, B. Anthonisse et al. // *A&A*. — 2011. — Jul. — Vol. 531. — P. A132. — 1105.0556.
- [287] The VLT-FLAMES Tarantula Survey. XVII. Physical and wind properties of massive stars at the top of the main sequence / J. M. Bestenlehner, G. Gräfener, J. S. Vink et al. // *A&A*. — 2014. — Oct. — Vol. 570. — P. A38. — 1407.1837.
- [288] Vink J. S., Gräfener G. The Transition Mass-loss Rate: Calibrating the Role of Line-driven Winds in Massive Star Evolution // *ApJ*. — 2012. — Jun. — Vol. 751, no. 2. — P. L34. — 1205.0394.
- [289] Castor J. I., Abbott D. C., Klein R. I. Radiation-driven winds in Of stars. // *ApJ*. — 1975. — Jan. — Vol. 195. — P. 157–174.
- [290] Abbott D. C. The theory of radiatively driven stellar winds. II. The line acceleration. // *ApJ*. — 1982. — Aug. — Vol. 259. — P. 282–301.
- [291] Puls J., Springmann U., Lennon M. Radiation driven winds of hot luminous stars. XIV. Line statistics and radiative driving // *A&AS*. — 2000. — Jan. — Vol. 141. — P. 23–64.
- [292] Self-consistent Solutions for Line-driven Winds of Hot Massive Stars: The m-CAK Procedure / Alex C. Gormaz-Matamala, M. Curé, L. S. Cidale,

- R. O. J. Venero // [ApJ](#). — 2019. — Mar. — Vol. 873, no. 2. — P. 131. — 1903.00417.
- [293] New self-consistent wind parameters to fit optical spectra of O-type stars observed with the HERMES spectrograph / A. C. Gormaz-Matamala, M. Curé, A. Lobel et al. // [A&A](#). — 2022. — May. — Vol. 661. — P. A51. — 2202.08735.
- [294] Method and new tabulations for flux-weighted line opacity and radiation line force in supersonic media / L. G. Poniatowski, N. D. Kee, J. O. Sundqvist et al. // [A&A](#). — 2022. — Nov. — Vol. 667. — P. A113. — 2204.09981.
- [295] Long-term spectroscopic monitoring of the Luminous Blue Variable HD 160529 / O. Stahl, T. Gäng, C. Sterken et al. // [A&A](#). — 2003. — Mar. — Vol. 400. — P. 279–291. — astro-ph/0212473.
- [296] Klochkova V. G., Panchuk V. E., Tavolzhanskaya N. S. High Resolution Optical Spectra of the Dormant LBV Star P Cyg // [Astronomy Reports](#). — 2023. — Dec. — Vol. 67, no. 12. — P. 1381–1393. — 2402.09061.
- [297] The H α Variations of the Luminous Blue Variable P Cygni: Discrete Absorption Components and the Short S Doradus-phase / N. D. Richardson, N. D. Morrison, D. R. Gies et al. // [AJ](#). — 2011. — Apr. — Vol. 141, no. 4. — P. 120. — 1101.4319.
- [298] Prinja R. K., Massa D., Fullerton A. W. Wind variability of B supergiants. IV. A survey of IUE time-series data of 11 B0 to B3 stars // [A&A](#). — 2002. — Jun. — Vol. 388. — P. 587–608.
- [299] Vink J. S., de Koter A., Lamers H. J. G. L. M. On the nature of the bi-stability jump in the winds of early-type supergiants // [A&A](#). — 1999. — Oct. — Vol. 350. — P. 181–196. — astro-ph/9908196.
- [300] Mass-loss implementation and temperature evolution of very massive stars / Gautham N. Sabhahit, Jorick S. Vink, Erin R. Higgins, Andreas A. C. Sander // [MNRAS](#). — 2022. — Aug. — Vol. 514, no. 3. — P. 3736–3753. — 2205.09125.

- [301] Vink J. S., Sabhahit G. N. Exploring the Red Supergiant wind kink. A Universal mass-loss concept for massive stars // [A&A](#). — 2023. — Oct. — Vol. 678. — P. L3. — 2309.08657.
- [302] Fundamental parameters of Wolf-Rayet stars. III. The evolutionary status of WNL stars. / P. A. Crowther, L. J. Smith, D. J. Hillier, W. Schmutz // [A&A](#). — 1995. — Jan. — Vol. 293. — P. 427–445.
- [303] Crowther P. A., Smith L. J. Fundamental parameters of Wolf-Rayet stars. VI. Large Magellanic Cloud WNL stars. // [A&A](#). — 1997. — Apr. — Vol. 320. — P. 500–524.
- [304] The Wolf-Rayet stars in M 31. I. Analysis of the late-type WN stars / A. Sander, H. Todt, R. Hainich, W. R. Hamann // [A&A](#). — 2014. — Mar. — Vol. 563. — P. A89. — 1402.2282.
- [305] The Panchromatic Hubble Andromeda Treasury: Triangulum Extended Region (PHATTER). I. Ultraviolet to Infrared Photometry of 22 Million Stars in M33 / Benjamin F. Williams, Meredith J. Durbin, Julianne J. Dalcanton et al. // [ApJS](#). — 2021. — Apr. — Vol. 253, no. 2. — P. 53. — 2101.01293.
- [306] PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code / Alessandro Bressan, Paola Marigo, Léo. Girardi et al. // [MNRAS](#). — 2012. — Nov. — Vol. 427, no. 1. — P. 127–145. — 1208.4498.
- [307] Oh S., Kroupa P., Pflamm-Altenburg J. Dependency of Dynamical Ejections of O Stars on the Masses of Very Young Star Clusters // [ApJ](#). — 2015. — Jun. — Vol. 805, no. 2. — P. 92. — 1503.08827.
- [308] Transforming observational data and theoretical isochrones into the ACS/WFC Vega-mag system / Luigi R. Bedin, Santi Cassisi, Fiorella Castelli et al. // [MNRAS](#). — 2005. — Mar. — Vol. 357, no. 3. — P. 1038–1048. — astro-ph/0412328.