

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»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз — 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Научный руководитель: **Винокуров Александр Сергеевич**,
кандидат физико-математических наук,
Специальная астрофизическая
обсерватория РАН,
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Погодин Михаил Александрович**,
доктор физико-математических наук,
Главная (Пулковская)
Астрономическая Обсерватория РАН,
заведующий лабораторией
физики звезд

Расторгуев Алексей Сергеевич,
доктор физико-математических наук,
Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова,
профессор, заведующий кафедрой
экспериментальной астрономии

Ведущая организация: Федеральное государственное
автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Южный федеральный университет»

Защита состоится _____ 20__ г. в __ часов на
заседании диссертационного совета 24.1.212.01 при САО РАН по
адресу: 369167, Карачаево-Черкесская Республика, Зеленчукский
район, пос. Нижний Архыз, САО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан _____ 20__ года.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.1.212.01,
канд. физ.-мат. наук

Шолухова О.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

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, в процессе гигантских выбросов вещества или вспышек сверхновых. На текущий момент многие вопросы эволюции массивных звезд остаются открытыми ввиду их малочисленности и короткого времени жизни, а так же сложного влияния физических процессов, таких как вращение и темп потери массы, на последующий эволюционный путь.

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 K и M). Наиболее массивные звезды ($M_{\text{init}} \gtrsim 20 - 25 M_{\odot}$) эволюционируют в звезды Вольфа-Райе (Wolf-Rayet, WR-звезды), 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 во многом определяет их дальнейшую эволюцию [1, 2]. 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 [3].

Во время визуального максимума LBVs температура фотосферы падает до 7000 – 8000 К, 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 [4]. В минимуме блеска температура звезды может

достигать более 25000 K [5]. 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 [6]. Как правило, для LBVs типичны как значительная переменность типа S Dor [7], так и микропеременность $\lesssim 0.1^m$ типа α Cyg [8], свойственная для большинства горячих сверхгигантов.

Предполагается, что наиболее массивные звезды в процессе эволюции попадают в так называемую полосу неустойчивости (LBV instability strip) [9], обусловленную сильным изменением непрозрачности в атмосфере. В совокупности с высокими светимостями данных объектов, близких к пределу Эддингтона, изменение непрозрачности приводит к существенным вариациям темпа оттока вещества, при этом сами звезды демонстрируют значительную переменность из-за резких флуктуаций оптической толщины протяженной атмосферы, 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 [10, 11], при этом величина темпа оттока вещества может на порядки превышать значения, наблюдаемые вне вспышек [12]. Наиболее ярким примером подобного объекта является η Carinae – одна из самых массивных звезд Млечного Пути, в ходе гигантского извержения в 1840-ых годах её светимость на пике достигала $\approx 10^{7.5} L_{\odot}$ [13], а суммарная масса выброшенного в ходе вспышки вещества превышает $10 M_{\odot}$ [14]. Природа механизма, порождающего эти извержения, равно как и источник энергии для повышения светимости и выбросов вещества на сегодняшний день не установлены.

Между тем, некоторые LBVs сохраняют стабильность в течение десятилетий после активной фазы. Характерным примером "спящей" LBV является галактический голубой гипергигант P Cygni, который с момента гигантских извержений в XVII веке остаётся в относительно стабильном состоянии на протяжении столетий [15]. Такая продолжительная фаза покоя иногда предшествует возобнов-

лению активности [16], однако физическая связь между этими двумя состояниями остаётся неизвестной.

В рамках классического сценария эволюции массивных звезд (т.н. "сценарий Конти") 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 [1, 17]. Таким образом, LBVs, предположительно, занимают промежуточное место в эволюции между массивными звёздами Главной последовательности ($M_{\text{init}} \gtrsim 20\text{--}25 M_{\odot}$) и WR-звездами [3]. Первоначально, в "сценарии Конти" предполагалось, что только звезды с массами $M_{\text{init}} \gtrsim 50 M_{\odot}$ и светимостями $\log L/L_{\odot} \gtrsim 5.8$ могут эволюционировать в LBVs. Последующие наблюдения и теоретические модели свидетельствуют о существовании менее массивных LBV-звезд с $M_{\text{init}} \approx 20 - 40 M_{\odot}$ и $5.1 \lesssim \log L/L_{\odot} \lesssim 5.6$ [18, 19].

Альтернативный подход в исследовании LBVs предполагает, что данные объекты являются продуктом эволюции тесных двойных систем с обменом массы [20]. 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 [21]. Результат, представленный в работе [21], вызвал активную дискуссию в научном сообществе [22–26]. 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 [27]. При этом результаты анализа кинематики LBVs/cLBVs и ассоциированных с ними звезд в Млечном Пути [28] и Магеллановых Облаках [29, 30] 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 [31]. 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 и характеристик звездного ветра 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. Эта задача особенно сложна в случае исследования звезд предельных светимостей, обладающих плотным ветром. Подобный ветер может полностью скрывать нижние слои атмосферы, формируя так называемую "псевдо-фотосферу". 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 [32,33], эти модели учитывают баланс радиальных сил в ветре звезды. На сегодняшний день гидродинамические не-ЛТР модели представлены в основном для голубых сверх- и гипергигантов [34,35] или WR-звёзд [36,37], 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 [38], либо в изолированных плотных сгустках газа при высоком темпе аккреции на центральный объект, позволяющем преодолеть давление излучения [39]. На сегодняшний день известно достаточно большое число примеров массивных звезд, расположенных вдали от скоплений или крупных областей звездообразования (например, [40, 41]), однако, вопрос о том является ли они все "убегаящими" звездами, выброшенными из скоплений, или некоторых из них были сформированы "in situ", является открытым. Согласно результатам ранних работ [42], 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 [43], тем не менее некоторые работы указывают на то, что значительная часть ОВ-звезд могла сформироваться локально [44]. Таким образом, анализ звездной среды позволяет углубить понимание возможных механизмов образования массивных звезд. 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 теку-

ций 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 ОВ-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 предположе-

нию 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 M33, 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 расчетов.

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 Suggi", 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 Suggi", 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 публика-

ций. 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** кратко 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 P 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 M33, 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 радиальных 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.

Список литературы

- [1] Humphreys R. M., Davidson K. The luminous blue variables: Astrophysical geysers // [PASP](#). — 1994. — Oct. — Vol. 106. — P. 1025–1051.
- [2] de Jager C. The yellow hypergiants // [A&A Rev.](#) — 1998. — Jan. — Vol. 8, no. 3. — P. 145–180.
- [3] Weis K., Bomans D. J. Luminous Blue Variables // [Galaxies](#). — 2020. — Feb. — Vol. 8, no. 1. — P. 20. — 2009.03144.
- [4] 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. // [A.J.](#) — 2007. — Dec. — Vol. 134. — P. 2474–2503. — 0709.1267.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] van Genderen A. M. S Doradus variables in the Galaxy and the Magellanic Clouds // [A&A](#). — 2001. — Feb. — Vol. 366. — P. 508–531.
- [8] 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.
- [9] 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. Damini, D. J. Hillier et al. // [ApJ](#). — 2009. — Nov. — Vol. 705, no. 1. — P. L25–L30. — 0909.4459.

- [10] 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](#).
- [11] 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](#).
- [12] 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](#).
- [13] 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](#).
- [14] 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](#).
- [15] 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](#).
- [16] 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](#).
- [17] 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.

- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Smith N. The isolation of luminous blue variables: on subdividing the sample // [MNRAS](#). — 2016. — Sep. — Vol. 461, no. 3. — P. 3353–3360. — 1607.01054.
- [24] Davidson K., Humphreys R. M., Weis K. LBVs and Statistical Inference // [arXiv e-prints](#). — 2016. — Aug. — P. arXiv:1608.02007. — 1608.02007.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Chentsov E. L. On the “Sociality” of Several White Hypergiants // [Astrophysical Bulletin](#). — 2021. — Jul. — Vol. 76, no. 3. — P. 286–291.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.

- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Zarriquet 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.

Бесплатно

Костенков Александр Евгеньевич

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

Подписано в печать _____ Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____