

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи
УДК 524.312-17/54:520.84; 524.358-17/54:520.84

МАРЬЕВА Ольга Викторовна

**СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭВОЛЮЦИИ
МАССИВНЫХ ЗВЁЗД**

01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз – 2016

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор, заведующая лабораторией астроспектроскопии САО РАН
Клочкова Валентина Георгиевна

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН, профессор

Шустов Борис Михайлович

научный руководитель Института астрономии РАН

- кандидат физико-математических наук, доцент

Шиманский Владислав Владимирович

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН (ГАО РАН)

Защита состоится 21 октября 2016 года в 10:00 на заседании Диссертационного совета Д 002.203.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук по адресу: 396167, Карачаево-Черкесская республика, Зеленчукский р-н, пос. Ниж.Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан “_____” 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 002.203.01 к.ф.-м.н. О. Н. Шолухова.

Актуальность темы

Массивные горячие звёзды – одна из важнейших составляющих звёздного населения. В данной работе *массивными звёздами* мы будем называть звёзды с массами от 8 до $150 M_{\odot}$, которые в конце своей жизни взрываются как сверхновые звёзды и либо превращаются в релятивистские объекты (в зависимости от массы, в нейтронные звёзды или чёрные дыры), либо полностью разрушаются в результате аннигиляционной неустойчивости (англ. pair instability supernova). Они являются основным источником ультрафиолетового излучения и тяжёлых химических элементов. Массивные звёзды оказывают огромное влияние на динамическую эволюцию родительских галактик как на финальных стадиях своей эволюции – через взрывы сверхновых звёзд, так и в течение всей своей жизни – посредством мощных звёздных ветров.

Хотя ещё в 1943 году Г. Гамов (Gamow, 1943) предположил, что спектральные особенности звёзд Вольфа-Райе связаны с выносом на поверхность продуктов ядерного горения, эволюционный статус этих звёзд оставался неясным до середины 70-х годов. В 1975 году П. Конти (Conti, 1975) высказал предположение, что звёзды класса O и Of, голубые переменные высокой светимости (англ. Luminous Blue Variables LBVs) и звёзды Вольфа-Райе – различные стадии, которые проходит массивная звезда в ходе своей эволюции. Хотя массивные звёзды теряют массу в виде звёздного ветра в течение всей своей жизни, в “сценарии Конти” особая роль отведена стадии LBV, во время которой звёзды сбрасывают основную часть вещества. Несмотря на продолжающиеся дискуссии об эволюционном статусе голубых переменных высокой светимости, “сценарий Конти” сегодня является общепринятым в теории эволюции массивных звёзд.

Эволюция массивных звёзд согласно современным представлениям протекает следующим образом: по мере выгорания водорода в ядре массивные звёзды смещаются вправо на диаграмме Герцшпрунга-Рассела (Г-Р), превращаясь из O и B-звёзд в красные сверхгиганты ($8M_{\odot} < M_{*} < 40M_{\odot}$) или в голубые переменные звёзды высокой светимости ($40M_{\odot} < M_{*} < 60M_{\odot}$) (Meunet et al., 2011). После чего более массивные ($M_{*} > 30M_{\odot}$) снова воз-

вращаются в левую часть диаграммы Г-Р и проходят стадию звезды Вольфа-Райе, которая является последней перед взрывом сверхновой. У менее массивных ($8M_{\odot} < M_* < 30M_{\odot}$) прародителями сверхновых напрямую являются красные сверхгиганты.

В 90-е годы начинается численное моделирование эволюции массивных звёзд. Благодаря существенному росту вычислительных мощностей компьютеров современные коды для расчёта звёздной эволюции стали надёжным инструментом для астрофизических исследований, для оценок возрастов звёзд, начальных масс, химического состава и т. д. Современные эволюционные коды целом хорошо описывают наблюдаемое расположение массивных звёзд – красных сверхгигантов, голубых переменных высокой светимости, звёзд Вольфа-Райе – на диаграмме Герцшпрунга-Рассела.

Однако в теории эволюции массивных звёзд существует и ряд спорных вопросов. Оценки потери массы одиночными объектами на стадии звёзд Вольфа-Райе, похоже, входят в противоречие с определяемыми из наблюдений сверхновых массами сбрасываемых ими оболочек – звёздный ветер, возможно, оказывается недостаточно эффективным путём потери массы (см. например обзоры Smith (2014) и Dessart (2015)). Также в последнее время появились работы в которых показывается, что прародителями некоторых сверхновых вероятно были гипергиганты, возможно даже LBV звёзды. Это может свидетельствовать о том, что по крайней мере некоторые голубые переменные высокой светимости являются конечной точкой звёздной эволюции, а не промежуточным её этапом. Для дальнейшего развития теории звёздной эволюции необходимо сравнение теоретических предсказаний с данными наблюдений, с параметрами реально существующих массивных звёзд. Актуальной задачей современной звёздной астрофизики является определение параметров звёзд на таких коротких стадиях эволюции, как голубые переменные высокой светимости, жёлтые гипергиганты, голубые сверхгиганты, звёзды Вольфа-Райе, и во время переходов между ними.

Детальному исследованию массивных звёзд на разных стадиях эволюции методами спектроскопии и численного моделирования атмосфер посвящена данная диссертация. Из-за сложности оценок расстояний до массивных звёзд

высокой светимости внутри Галактики, для исследования выбраны внегалактические объекты и Галактические, принадлежащие звёздной ассоциации Cygnus OB2, расстояние до которой измерено различными методами.

Цели и задачи исследования

Цель работы: комплексное исследование массивных звёзд на смежных стадиях эволюции.

В работе были поставлены следующие задачи:

- Детальное изучение избранных массивных звёзд методами спектроскопии и численного моделирования. Определение основных параметров массивных звёзд на стадии сверхгиганта и звезды Вольфа-Райе, а также в кратковременной переходной фазе LBV.
- Определение параметров OB-звёзд со слабыми ветрами, принадлежащих к ассоциации Cyg OB2. Проверка на основе этих оценок гипотезы об аномалиях химического состава у звёзд ассоциации и о каскадном процессе звездообразования в Cyg OB2.
- Исследование центральной области ассоциации Cyg OB2 вблизи гипергиганта Cyg OB2 №12 с помощью длиннощелевой спектроскопии и фотометрии, построение карты межзвёздного покраснения для данной области и прояснение природы аномального покраснения №12.

Научная новизна работы

Научная новизна определяется уникальными спектральными данными, полученными на приборах мирового уровня, установленных на 6-м телескопе САО РАН, в том числе в ходе выполнения наблюдательных программ по оригинальным заявкам автора работы. Также новизна получаемых результатов обеспечивается применением для анализа полученной информации метода численного моделирования звёздных атмосфер и использованием современных программных средств, отражающих последние достижения мировой науки в теории звёздных атмосфер.

- Данная работа является первым исследованием, в котором квазиодно- временно с помощью единой методики рассмотрена *массивная звезда* на трёх важных этапах эволюции: в стадии О-сверхгиганта, в стадии звезды Вольфа-Райе и в кратковременной фазе перехода из голубых переменных высокой светимости в стадию звёзд Вольфа-Райе.
- Впервые проведено численное моделирование оптического спектра мало- изученной WN звезды FSZ35, принадлежащей галактике M33, и опре- делены ее параметры: болометрическая светимость, эффективная тем- пература, темп потери массы, скорость ветра, содержание водорода в атмосфере. Уточнена спектральная классификация FSZ35: звезда при- надлежит к богатым водородом WN8 звёздам (WN8h). Также проведе- но моделирование Галактической WN звезды WR156, которое позволило уточнить параметры ветра и впервые определить её химический состав.
- Впервые проведено численное моделирование спектра уникальной пере- менной звезды Романо. На основе девяти моделей, описывающих наблю- дательные данные, полученные между 2002 и 2015 годом разными автора- ми, впервые удалось проследить за изменениями параметров атмосферы звезды. Впервые для звезды Романо установлено, что структура звёзд- ного ветра меняется синхронно с наблюдаемой яркостью и показано, как ветер из горячего быстрого в минимумах блеска становится медленным и плотным в максимумах. Впервые продемонстрировано, что болометри- ческая светимость звезды Романо изменяется при изменениях визуаль- ного блеска объекта, что не характерно для голубых переменных высо- кой светимости. Выдвинута гипотеза о том, что звезда Романо является массивной, далеко проэволюционировавшей звездой, прошедшей стадию голубых переменных высокой светимости и переходящей в стадию звезды Вольфа-Райе.
- Для звёзд MT259, MT282, MT299, MT317 и MT343, принадлежащих к ассоциации Суг OB2, впервые определены физические параметры атмо- сфер, такие как болометрическая светимость, эффективная температу- ра, ускорение свободного падения, а также сделаны оценки темпа потери

массы и скорости ветра на бесконечности. Для каждой из пяти звёзд определён возраст, что позволило подтвердить гипотезу о каскадном процессе звездообразования в ассоциации. Кроме того, для звёзд МТ259 и МТ317 впервые выполнены оценки содержаний CNO элементов в атмосфере.

- Впервые проведена спектроскопия и спектральная классификация 22 слабых звёзд (13-20 зв. вел.) в окрестностях гипергиганта Cyg OB2 №12. Для всех звёзд измерено межзвёздное покраснение и оценено расстояние. Список звёзд ассоциации пополнен 10 новыми сильно поглощенными звёздами. Для области вблизи №12 впервые построена карта межзвёздного покраснения с пространственным разрешением около 30'' и показано, что покраснение возрастает при приближении к звезде №12. Последнее является весомым аргументом в пользу гипотезы об околозвёздной природе аномального покраснения гипергиганта.

Научная и практическая значимость работы

- Объединение численного моделирования атмосфер OB и WR звёзд с анализом их эволюционных треков имеет большое значение для уточнения моделей эволюции массивных звёзд, для непосредственной оценки темпа потери массы и химического содержания элементов на той или иной эволюционной стадии.
- Представленные в работе результаты численного моделирования атмосфер восьми OB-звёзд важны для дальнейших исследований OB-звёзд в целом.
- В работе показано, что модели атмосфер, построенные с помощью программного пакета CMFGEN, хорошо описывают распределение энергии в спектрах горячих звёзд, а следовательно этот код может быть использован для определения болометрических поправок и показателей цвета звёзд ранних спектральных классов. Из-за малочисленности OB-звёзд с известными расстояниями эта задача остается актуальной для современной астрофизики, несмотря на большое число уже накопленных наблю-

дательных данных.

- В связи со значительной вычислительной сложностью и трудоёмкостью расчётов моделей звёздных атмосфер с помощью программного пакета CMFGEN, большое практическое значение имеет построенная в ходе работы над диссертацией сетка моделей, которые могут в дальнейшем применяться для исследования других OB и WR звёзд.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Определение основных физических параметров, включая структуру ветра, светимость, температуру и химический состав, для OB звёзд из ассоциации Cyg OB2 методом моделей атмосфер.
2. Вывод о том, что звезда Романо наблюдается в момент перехода от стадии голубой переменной высокой светимости (LBV) к звезде типа Вольфа-Райе (т. е. является post-LBV звездой). Наблюдаемая у неё спектральная и фотометрическая переменность вызвана окончанием фазы горения водорода в ядре.
3. Основные физические параметры и химический состав атмосфер двух звёзд Вольфа-Райе, определённые методом численного моделирования. Уточнение эволюционного статуса этих звёзд.
4. Результаты спектральных и фотометрических наблюдений и спектральной классификации 22 слабых звёзд, лежащих вблизи гипергиганта Cyg OB2 №12. Добавление 10 новых звёзд в список звёзд принадлежащих Cyg OB2.
5. Вывод об околозвёздной природе избытка покраснения звезды Cyg OB2 №12, полученный за счёт анализа пространственной структуры межзвездного поглощения в её окрестности.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых журналах (12 статей общим объемом 118 страниц, в т.ч. 10 статей, написанных совместно с

другими авторами):

1. Maryeva O.V., Abolmasov P.K. “*Modeling the optical spectrum of Romano’s star*”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS), 419, 1455-1464, (2012), arXiv:1109.0443
2. Maryeva O.V., Abolmasov P.K. “*Spectral study of the late nitrogen-sequence Wolf-Rayet star FSZ35 in M33*”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS), 421, 1189-1195,(2012), arXiv:1109.0445.
3. Maryeva O.V., Zhuchkov R.Ya. “*Medium resolution spectroscopy of the supergiant O31f Cyg OB2 No. 7*”, Astrophysics, 55, 3, 371-376, (2012), arXiv:1210.7096.
4. Maryeva O.V. “*Modeling Hydrogen-Rich Wolf-Rayet Stars in M33*”, Astronomical and Astrophysical Transaction (AapTr), 28, 1, 35-42, (2013), arXiv:1303.2366
5. Maryeva O.V., Afanasiev V.L., Panchuk V.E., “*Study of the late nitrogen-sequence Galactic Wolf-Rayet star WR156. Spectropolarimetry and modeling*”, New Astronomy, 25, 27-31, (2013)
6. Maryeva O.V., Klochkova V.G., Chentsov E.L., “*Modeling of a spectrum of supergiant Cyg OB2 №7*”, Astrophysical Bulletin, 68, 1, 87-100, (2013)
7. Maryeva O.V., Zhuchkov R.Ya., Malogolovets E.V. “*Investigation of Cyg OB2 №11(O5 Ifc) by Modelling its Atmosphere*”, Publications of the Astronomical Society of Australia (PASA), #31, e020, (2014), arXiv:1403.2771
8. Maryeva O.V. “*The half-century history of studies of Romano’s star*”, Baltic Astronomy, 23, 248-254, (2014), arXiv:1411.2662
9. Maryeva O.V., Parfenov S.Yu., Yushkin M.V., Shapovalova A.S., Gorda S. Yu., “*Properties of dwarf stars in Cygnus OB2*”, Publications of the Astronomical Society of Australia (PASA), #33, e002 (2016), arXiv:1512.05416.
10. Maryeva O.V., Chentsov E.L., Goranskij V.P. and Karpov S.V., “*Analysis of interstellar extinction towards the hypergiant Cygnus OB2 №12*”, Baltic Astronomy, 25, 42-48, (2016).

11. Maryeva O.V., Chentsov E.L., Goranskij V.P., Dyachenko V.V., Karpov S.V., Malogolovets E.V., Rastegaev D.A., “*On the nature of high reddening of Cygnus OB2 №12 hypergiant*”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS), 458, 491-507, (2016), arXiv:1602.05042
12. Polcaro V.F., Maryeva O.V., Nesci R., Calabresi M., Chieffi A., Galletti S., Gualandi R., Haver R., Mills O.F., Osborn W.H., Pasquali A., Rossi C., Vasilyeva T., Viotti R.F., “*GR 290 (Romano’s Star): 2. Light history and evolutionary state*”, Astronomical Journal (AJ), 151, 149, (2016), arXiv:1603.07284

Другие публикации по теме работы (8 статей в трудах конференций):

13. Maryeva O.V. “*Modeling atmospheres of Wolf-Rayet stars*”, Обзорение прикладной и промышленной математики, 17, 6, 908-909 (2010)
14. Maryeva O.V., Abolmasov P.K. “*Modeling the optical spectrum of Romano’s star in Minimum Brightness*”, Odessa Astronomical Publications, 23, 79-83 (2010)
15. Марьева О.В., “*Моделирование спектра сверхгиганта O3 If* Cyg OB2 №7*”, Известия КрАО, #108, 2, (2012)
16. Maryeva, O.V., Klochkova, V.G., Chentsov, E.L. “*Modeling of atmospheres of the brightest stars belonging to the Cyg OB2 association*”, материалы конференции “Massive Stars: From α to Ω ”, (2013), arXiv:1309.4495
17. Maryeva O.V., Parfenov S.Yu. “*Investigation of the brightest stars in the Cyg OB2 association*”, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium “New windows on massive stars: asteroseismology, interferometry, and spectropolarimetry”, 307, 119-120, (2015)
18. Maryeva O.V. “*Spectropolarimetry and modeling of WR156*”, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium “New windows on massive stars: asteroseismology, interferometry, and spectropolarimetry”, 307, 387-388, (2015)
19. Maryeva O., Polcaro V. F., Rossi C., Viotti R., “*Modeling of spectral variability*

of Romano's star", материалы совещания по WR звёздам, Universitätsverlag Potsdam, 361, (2015)

20. Rossi C., Polcaro V.F., Maryeva O., Gualandi R., Nesci R., Chieffi A., Viotti R.F. , "*Past, Present and Future of the luminous variable Romano's Star in M33*", материалы EWASS, MEMORIE della Societa Astronomica Italiana, 87, 307, (2016)

Личный вклад автора

В большинстве приведённых выше работ вклад автора является определяющим и состоит в формулировке задачи, получении и обработке наблюдательных данных, их анализе, проведении их численного моделирования, а также интерпретации полученных результатов и написании текста публикаций. Личный вклад включает в себя:

- проведение численного моделирования спектров с помощью программного пакета CMFGEN в работах [1]-[9] и [12].
- написание основной части текста статьи и формулировка результатов [1]-[8], [10]-[11], в работе [9] текст написан наравне с С.Ю. Парфеновым.
- обработка данных со SCORPIO (6-м телескоп САО РАН) и со спектрографа ISIS (телескоп им. Вильяма Гершеля) [1], [2], [4], [7-12].
- участие в проведении наблюдений [1], [2], [4], [8-12].
- в работе [12] обсуждение и формулировка результатов наравне с соавторами.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались автором на семинарах и конкурсах-конференциях САО РАН, а также представлялись на 6 российских и 11 международных:

1. Международная конференция “Переменные звезды - 2010”, 16-21 августа 2010 г., Украина, Одесса, Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова.
2. Всероссийская конференция “Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2010) “От эпохи Галилея до наших дней” ”, 13-18 сентября 2010 г., Нижний Архыз, САО РАН.
3. Международная конференция “European Week of Astronomy and Space Science (Jenam 2011)”, 4-8 июля 2011 г., Санкт-Петербург.
4. Международная конференция “Звёздные атмосферы: фундаментальные параметры звезд, химический состав и магнитные поля”, 10-14 июня 2012 г., Украина, пос. Научный, НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”
5. Международное совещание “A Workshop on Outstanding Problems in Massive Star Research – the final stages”, 30 сентября – 3 октября, 2012, США , Сент-Пол, Миннесота.
6. Всероссийская конференция “Всероссийская молодежная астрономическая конференция “Наблюдаемые проявления эволюции звёзд” ”, 15-19 октября 2012 г., Нижний Архыз, САО РАН.
7. Всероссийская конференция “Молодые ученые России 2013”, 15-16 апреля 2013 г., Москва, фонд “Династия”.
8. Международная конференция “Massive stars from alpha to Omega”, 10-14 июня 2013, Родос, Греция.
9. Всероссийская конференция “ВАК-2013: Многоликая Вселенная”, секционный доклад “Исследование атмосфер О-сверхгигантов ассоциации Cyg OB2”, 23-27 сентября, 2013, Санкт-Петербург.
10. Всероссийская конференция “Современная звездная астрономия - 2014”, посвященная 125-летию со дня рождения Бориса Петровича Герасимовича и 110-летию со дня рождения Бориса Александровича Воронцова-

Вельяминова, 28-30 мая 2014 г., Ростов-на-Дону, Научно-исследовательский институт физики ЮФУ.

11. Международная конференция “Звездные Атмосферы: фундаментальные параметры звезд, химический состав и магнитные поля”, 23-27 июня 2014 г., Главная Астрономическая Обсерватория РАН (Пулково), С.-Петербург, Россия.
12. Международная конференция “New Windows on massive stars: asteroseismology, interferometry and spectropolarimetry” (IAU Symposium 307), 23-27 июня 2014, Женевский университет, Женева, Швейцария.
13. Международная конференция “European Week of Astronomy and Space Science” (EWASS 2014), на секции “Fast outflows in massive stars: from single objects to wind-fed and colliding-wind binaries” (symposium S7), 30 июня – 4 июля, Женева, Швейцария.
14. Всероссийская конференция “Астрономия от ближнего космоса до космологических далей”, приуроченная к XII съезду Международной общественной организации “Астрономическое общество”, 25-30 мая 2015 г., Москва, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.
15. Международное совещание “Wolf-Rayet stars”, 1-5 июня 2015 г., Германия, Потсдам.
16. Международная конференция “Механизмы излучения космических объектов: классика и современность”, 21-25 сентябрь 2015 г., Санкт-Петербург.
17. Международная конференция European Week of Astronomy and Space Science (EWASS), 22-26 июня 2015 г., Испания, Тенерифе, университет Ла-Лагуна.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы. Она содержит 172 страницы, 55 рисунков, 24 таблицы. Список литературы

насчитывает 257 наименований.

Содержание работы по главам

Введение

Во введении обсуждаются актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна, научная и практическая значимость работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту, а также приводится список работ, в которых опубликованы результаты диссертации с указанием личного вклада автора в совместных публикациях.

Глава I: Массивные звёзды и моделирование их атмосфер

Первая глава содержит расширенное введение в обсуждаемые в диссертации задачи, а также описывает используемые для их решения методы и подходы. Раздел 1.1 посвящен эволюции массивных звёзд. В нём кратко рассказывается об истории их исследования, о том, что представляет собой общепринятый в современной теории эволюции массивных звёзд “сценарий Конти”, приводятся схемы, описывающие эволюцию звёзд с начальными массами от 10 до $90M_{\odot}$, а также обсуждаются некоторые спорные моменты и нерешённые проблемы этого сценария.

В разделе 1.2 рассмотрена история развития теории атмосфер горячих звёзд от открытия звёздного ветра до разработки программ для расчёта протяженных атмосфер со сферической геометрией, и современное состояние исследований в области моделирования звёздных атмосфер.

В данной работе в качестве основного метода численного моделирования используется код CMFGEN, разработанный Дж. Хиллером (Hillier & Miller, 1998) для построения моделей расширяющихся сферически-симметричных звёздных атмосфер. В разделе 1.3 приводится описание этого кода и основных физических процессов, которые в него заложены.

Глава II: Исследование OB-звёзд, находящихся вблизи Главной Последовательности

Вторая глава посвящена исследованию OB-звёзд MT259 (B0), MT282 (B1), MT299 (O7.5), MT317 (O8) и MT343 (B1), принадлежащих к ассоциации Cygnus OB2 (Cyg OB2) и первоначально классифицированных как карлики Главной последовательности. Ассоциация Cyg OB2, открытая Мюнчем и Морганом в 1953 году (Münch & Morgan, 1953), находится на расстоянии 1.5 кпк (Mel'nik & Dambis, 2009) и, согласно оценкам Wright et al. (2015), включает в себя 166 OB-звёзд. Надёжно измеренное расстояние до ассоциации позволяет точно определять светимость принадлежащих к ней звёзд. Это обстоятельство объясняет большой интерес исследователей к отдельным объектам из этой ассоциации.

В разделе 2.1 описываются использованные в работе наблюдательные данные, полученные на шестиметровом телескопе САО РАН: спектры высокого разрешения, полученные на эшелле спектрографе НЭС, и спектры низкого разрешения, полученные со спектрографом SCORPIO в длиннощелевой моде.

В разделе 2.2 говорится о особенностях моделирования атмосфер выбранных звёзд, а в разделе 2.3 обсуждаются результаты этого моделирования, положения исследуемых объектов на диаграммах Герцшпрунга-Рассела (Г-Р) и $\log g - T_{\text{eff}}$ и сопоставление их с эволюционными треками и изохронами. Для всех пяти звёзд определено содержание водорода (отношение H/He), кроме того для звёзд MT259 и MT317 выполнены оценки содержаний CNO элементов в атмосфере. Аномалий химического состава у этих звёзд не обнаружено.

Звёзды MT282 и MT317 показывают более высокую светимость, чем близкие к ним по спектральному классу MT343 и MT299, и, согласно результатам моделирования, их следует классифицировать как субгиганты (IV класс светимости) (раздел 2.3.1). Сравнение спектральных масс – масс, полученных из численного моделирования их спектров, – с эволюционными массами, оцененными по положению на диаграммах Г-Р и $\log g - T_{\text{eff}}$, показывает, что спектральные массы в пределах ошибок согласуются с эволюционными (раздел 2.3.2). Возраста MT259, MT299 и MT317, как и у большей части звёзд в

ассоциации, лежат в интервале 4-6 млн. лет (раздел 2.3.2). Звёзды же МТ282 и МТ343 принадлежат к более старому населению, их возраста превышают 10 млн. лет, что подтверждает гипотезу о каскадном процессе звездообразования в ассоциации.

ОВ-звёзды IV-V класса светимости отличаются от сверхгигантов значительно более слабыми ветрами, темп потери массы у них порядка $10^{-7}M_{\odot}/\text{год}$. Вследствие этого линии с P Cyg профилями ветровой природы, по которым можно измерить темп потери массы, у этих звёзд наблюдаются только в ультрафиолетовом диапазоне. Проведённое моделирование оптических спектров ОВ-звёзд позволяет сделать верхнюю оценку темпа потери массы (раздел 2.3.3). Оценки темпа потери массы для исследуемых звёзд согласуются с теоретическими оценками.

В разделе 2.4 подводятся краткие итоги второй главы.

Глава III: Исследование звёзд-сверхгигантов Cyg OB2 №7 и №11

В третьей главе рассматриваются два сверхгиганта – Cyg OB2 №7 (O3If_{*}) и №11 (O5.5If). В разделе 3.1 представлены наблюдательные данные. Для исследования сверхгигантов в работе объединены архивные данные спектроскопии объектов в ультрафиолетовом, оптическом и инфракрасном диапазонах, с результатами спектральных наблюдений на 6-м телескопе САО РАН и 1.5-м Российско-Турецком телескопе.

В разделе 3.2 описана сетка моделей O-звёзд, построенная в рамках данного исследования, и рассмотрено, как изменение модельных параметров влияет на вид синтетического спектра.

Раздел 3.3 посвящен Cyg OB2 №7 – одной из самых горячих звёзд в Галактике. В 3.3.3 показано, что описание отдельных линий спектра №7 невозможно в рамках единой модели с простым ветровым законом – требуется либо привлекать соображения о несферичности ветра (возможно, связанной с быстрым вращением звезды), либо модифицировать вид его скоростного закона. Помимо этого, наши результаты подтверждают вывод Puls et al. (2006) об изменении степени неоднородности ветра с удалением от звезды. Анализ

положения этого объекта на диаграмме Герцшпрунга-Рассела показывает, что масса звезды около $60 M_{\odot}$, а возраст приблизительно 3 млн. лет.

Раздел 3.4 посвящен Cyg OB2 №11, принадлежащей к малочисленному подклассу Ofc звёзд, в спектрах которых линии углерода C III $\lambda\lambda 4647, 4650, 4652$ по интенсивности сравнимы с линиями N III $\lambda\lambda 4634, 4640, 4642$. В разделе 3.4.1 определены физические параметры звезды №11, а в разделе 3.4.2 – химический состав. Благодаря тому, что исследование №11 проводилось по спектральным данным, охватывающим широкий диапазон длин волн, нам удалось оценить не только долю гелия в атмосфере звезды, но и содержания CNO элементов. Из сравнения проведенного в разделе 3.4.3 видно, что содержание азота в атмосфере №11 ниже, чем у “нормальных” O-сверхгигантов, тогда как содержание углерода близко к солнечному. В целом видно, что вопрос о причине, вызывающей подавление выноса в атмосферу продуктов ядерного горения, до сих остаётся открытым и требует дальнейших исследований.

Глава IV: Исследование переменности звезды Романо

Четвёртая глава посвящена результатам многолетнего исследования переменности звезды Романо. В разделе 4.1 даётся обзор литературы, посвященной истории исследования этого объекта. Звезда Романо, классифицированная как LBV (см. обзор (Mamyeva, 2014) и ссылки в нём), находится в галактике M33 и демонстрирует сильную фотометрическую и спектральную переменность. Амплитуда фотометрической переменности достигает 1.5 зв. вел. Но, в отличие от классических LBV, у которых в максимуме блеска спектры похожи на спектры A-F сверхгигантов, а в минимуме – на спектры звёзд типа Ofp/WN, спектр звезды Романо изменяется лишь на несколько спектральных подклассов от WN11 в максимуме блеска до WN8 в минимуме (Mamyeva & Abolmasov, 2010). Только во время исторического максимума блеска в 1992 году звезда показала более холодный спектр позднего B-сверхгиганта (Szeifert, 1996). Именно такая нетипичная спектральная переменность послужила основанием для проведения детального моделирования

её атмосферы в разные моменты времени.

В разделе 4.2 рассказывается о моделировании атмосферы звезды Романо. На основании девяти спектров, полученных с 2002 по 2014 год (наблюдательные данные описаны в пункте 4.2.1), были определены параметры звезды в разных фазах активности. В пункте 4.2.2 описываются основные модельные предположения, а в пункте 4.2.3 представляются результаты численных расчётов. По построенным моделям удаётся проследить за поведением ветра звезды Романо – за тем, как из горячего быстрого в минимумах блеска ветер становится медленным и плотным в максимумах. Результаты моделирования показывают, что при понижении визуального блеска болометрическая светимость звезды также уменьшается, т.е. у звезды Романо наблюдается нетипичное для LBV звёзд изменение болометрической светимости, коррелирующее с изменениями видимой звёздной величины.

Раздел 4.3 посвящен эволюционному статусу звезды Романо. В этом разделе обсуждается положение звезды Романо на диаграмме Герцшпрунга-Рассела: только в момент вспышки 2005 года звезда Романо лежала на полосе неустойчивости LBV звёзд, в другие же даты звезда располагалась левее этой полосы в области звёзд Вольфа-Райе. На диаграмме *содержание водорода – светимость* звезда Романо также лежит в области звёзд Вольфа-Райе, ниже классических LBV звёзд. Это свидетельствует о том, что звезда Романо является более проэволюционировавшим объектом, чем известные LBV звёзды. Мы приходим к выводу, что этот объект наблюдается на ещё более редкой эволюционной стадии – в момент перехода от звёзд LBV к звёздам Вольфа-Райе, и является таким образом первым известным пост-LBV объектом.

Глава V: Исследование звёзд Вольфа-Райе азотной последовательности WR156 и FSZ35

Согласно современной теории звёздной эволюции, массивные звёзды, пройдя стадию голубых переменных высокой светимости, превращаются в звёзды Вольфа-Райе. Исследованию двух звёзд Вольфа-Райе азотной последовательности – WR156 и FSZ35 – посвящена пятая глава диссертации. В разделе 5.1.1 даны общие сведения об этих объектах, а также приведена история их иссле-

дования. Обе звезды относятся к спектральному типу WN8; WR156 принадлежит нашей Галактике, а FSZ35 – галактике M33. Так как в большинстве случаев звёзды WN8 не входят в звёздные ассоциации (Crowther et al., 1995), при исследовании объектов такого типа в нашей Галактике возникают сложности с определением расстояния, и следовательно – с оценкой их светимости. Поэтому большое значение имеет изучение внегалактических WN8 звёзд.

В разделе 5.2 описаны наблюдательные данные, использованные в данной работе. Раздел 5.3 посвящен спектральной классификации FSZ35, в этом же разделе проводится сравнение спектра FSZ35 со спектром рассмотренной выше звезды Романо и приводится список линий, отождествлённых в спектре FSZ35. В разделе 5.4 рассказывается о построении моделей атмосфер WR156 и FSZ35, о методе характеристических диаграмм, который был использован как один из способов сравнения синтетических спектров с наблюдаемыми, и о результатах исследования, которые суммируются в разделе 5.5.

В результате проведённого в этой главе исследования показывается, что FSZ35 по своим параметрам – главным образом, по содержанию водорода – близка к другим известным звёздам спектрального класса WN8, богатым водородом (WN8h), что позволяет нам уточнить спектральную классификацию Massey & Johnson (1998) и уверенно отнести FSZ35 к типу WN8h. Для второй звезды – WR156 – показывается, что, согласно нашим оценкам доли водорода в атмосфере, она является самой богатой водородом звездой типа WN8 в Галактике. Скорость ветра WR156 ниже, чем у других звёзд типа WN8h, и по этому параметру WR156 лежит между пост-LBV звездой Романо и звёздами типа WN8h. Вероятно, WR156 относительно недавно перешла в область звёзд азотной последовательности (WN) и является менее проэволюционировавшей по сравнению с FSZ35. С этим предположением согласуется и положение звёзд на диаграмме *светимость – массовая доля водорода*: FSZ35 и WR156 находятся примерно на одном и том же эволюционном треке, но WR156 находится выше и ближе к известным LBV звёздам. На диаграмме Герцшпрунга-Рассела звёзды FSZ35 и WR156, так же как и звезда Романо, располагаются на эволюционном треке $50 M_{\odot}$, левее (соответственно горячее) звезды Романо, что также подтверждает, что они – более проэволюциониро-

вавшие объекты.

Глава VI: Изучение окрестностей гипергиганта Cyg OB2 №12 / МТ 304

Шестая глава посвящена исследованию окрестностей звезды Cyg OB2 №12. Звезда Cyg OB2 №12 (Schulte 12, МТ 304) – одна из ярчайших звёзд нашей Галактики, её болометрическая светимость составляет $1.9 \cdot 10^6 L_{\odot}$ по оценкам Clark et al. (2012). Интересна она не только своей огромной массой ($110 M_{\odot}$ согласно Clark et al. (2012)), но и аномально сильным покраснением (~ 10 зв. вел.), которое заметно превышает среднее покраснение в ассоциации.

В разделе 6.1 рассказывается о звезде МТ 304 и приводится обзор литературы, посвященной исследованию межзвёздного поглощения в направлении ассоциации Cyg OB2.

В разделе 6.2 описаны наблюдательные данные и основные этапы редукции этих данных. Со спектрографом SCORPIO на БТА были получены спектры 25 звёзд, близких к гипергиганту. Фотометрия этих звёзд была проведена по снимкам, полученным на 1-м телескопе Цейсс и на БТА (также со SCORPIO).

В разделе 6.3 представляются результаты спектральной классификации 25 звёзд, близких к гипергиганту, а также измерения покраснения в их направлении и оценки расстояния до каждого объекта. В разделе 6.4 проводится обсуждение результатов. В результате проведённого в этой главе исследования, во-первых, пополнен список звёзд, принадлежащих к Cyg OB2, десятью новыми В звёздами. Во-вторых, построена карта межзвёздного покраснения в области МТ 304 (радиус исследованной области 2.5 угловых минуты) и найдено, что покраснение возрастает при приближении к МТ 304. Самое сильное поглощение наблюдается в направлении МТ 304 (около 10 зв. величин), а также двух звёзд J203240.35+411420.1 и J203239.90+411436.2 (номера согласно каталогу SDSS), отстоящих от МТ 304 всего на 15 угловых секунд и имеющих покраснение около 9 зв. величин. Среднее же покраснение в поле составляет всего 8 зв. величин – избыток в 2 величины у объекта МТ 304 связан, вероятно, с околозвёздной оболочкой радиусом в несколько десятых долей парсека, которая охватывает и ближайшие звёзды.

Заключение

В заключении формулируются основные выводы диссертации.

Литература

- Clark J. S., Najarro F., Negueruela I., Ritchie B. W., Urbaneja M. A., Howarth I. D., 2012, *A&A*, 541, A145
- Conti P. S., 1975, *Memoires of the Societe Royale des Sciences de Liege*, 9, 193
- Crowther P. A., Smith L. J., Hillier D. J., Schmutz W., 1995, *A&A*, 293, 427
- Dessart L., 2015, in Hamann W.-R., Sander A., Todt H., eds, *Wolf-Rayet Stars: Proceedings of an International Workshop held in Potsdam, Germany, 1-5 June 2015*. Edited by Wolf-Rainer Hamann, Andreas Sander, Helge Todt. Universitätsverlag Potsdam, 2015., p.245-250. pp 245–250
- Gamow G., 1943, *ApJ*, 98, 500
- Hillier D. J., Miller D. L., 1998, *ApJ*, 496, 407
- Maryeva O., 2014, *Baltic Astronomy*, 23, 248
- Maryeva O., Abolmasov P., 2010, *RevMexAA*, 46, 279
- Massey P., Johnson O., 1998, *ApJ*, 505, 793
- Mel'nik A. M., Dambis A. K., 2009, *MNRAS*, 400, 518
- Meynet G., Georgy C., Hirschi R., Maeder A., Massey P., Przybilla N., Nieva M.-F., 2011, *Bulletin de la Societe Royale des Sciences de Liege*, 80, 266
- Münch L., Morgan W. W., 1953, *ApJ*, 118, 161
- Puls J., Markova N., Scuderi S., Stanghellini C., Taranova O. G., Burnley A. W., Howarth I. D., 2006, *A&A*, 454, 625
- Smith N., 2014, *ARA&A*, 52, 487

Szeifert T., 1996, in Vreux J. M., Detal A., Fraipont-Caro D., Gosset E., Rauw G., eds, Liege International Astrophysical Colloquia Vol. 33, Liege International Astrophysical Colloquia. p. 459

Wright N. J., Drew J. E., Mohr-Smith M., 2015, MNRAS, 449, 741

Бесплатно

О.В. Марьева

Спектроскопические проявления
эволюции массивных звёзд.

Зак. N200с Уч. изд. л. – 1.0 Тираж 100
Специальная астрофизическая обсерватория РАН