

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук

На правах рукописи
УДК 524.338-31.01

Соловьева Юлия Николаевна

**ЯРЧАЙШИЕ ЗВЁЗДЫ ЗА ПРЕДЕЛАМИ МЕСТНОЙ ГРУППЫ
ГАЛАКТИК**

Специальность 01.03.02 –
«Астрофизика и звёздная астрономия»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз–2021

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

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., г.н.с. лаборатории физики звёзд САО РАН **Фабрика Сергей Николаевич**

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой экспериментальной астрономии физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова **Расторгуев Алексей Сергеевич**

д.ф.-м.н., в.н.с. отдела физики звёзд КрАО РАН **Тарасов Анатолий Евгеньевич**

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

Защита диссертации состоится "__" декабря 2021 года в "__" часов на заседании диссертационного совета Д002.203.01 при САО РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан "__" октября 2021 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д002.203.01, к.ф.-м.н.

Шолухова О.Н.

Актуальность темы

Поиск и изучение массивных звёзд представляет собой одну из самых актуальных задач современной астрофизики. Их эволюция коротка по сравнению с временем жизни галактик, однако, массивные звёзды значительно влияют на химическую и динамическую эволюцию газа галактик, нагревая межзвёздную среду на значительных расстояниях от комплексов звездообразования и обогащая её тяжёлыми элементами, которые образуются на финальных стадиях эволюции этих звёзд.

Массивные звёзды являются ярчайшими звёздами, наблюдаемыми в других галактиках. К ним главным образом относятся различные типы сверхгигантов. В классификации, предложенной Р. Хэмфрис и соавторами [1], звёзды высокой светимости разделяются на несколько типов по спектральным и фотометрическим особенностям: Of/late-WN-звёзды, яркие голубые переменные (luminous blue variables, LBVs), тёплые (жёлтые) гипергиганты, Fe II-эмиссионные звёзды, горячие и промежуточные сверхгиганты, V[e]-сверхгиганты. Последние отличаются наличием пылевого диска, связанного с мощным истечением вещества в экваториальной плоскости. Их спектры характеризуются сильными эмиссионными линиями водорода и множеством запрещённых линий [Fe II], а также [O I] и иногда [Ca II]. Отличительной особенностью тёплых гипергигантов и жёлтых сверхгигантов является абсорбционный спектр A-F звёзд с эмиссионными линиями водорода. Звёзды Of/late-WN имеют спектральные характеристики звёзд типа Of и поздних WN с эмиссионными линиями N III и He II наряду с сильными линиями излучения водорода и He I. Звёзды с эмиссиями Fe II ("железные звёзды") показывают спектры с голубым континуумом, сильными эмиссионными линиями водорода и многочисленными линиями Fe II без линий поглощения. Тип горячих сверхгигантов включает в себя O- и B- звёзды, спектры которых содержат как эмиссионные линии (водород, железо Fe II и др.), так и абсорбционные (гелий He I и некоторые линии азота N II, кислорода O II и др.). Для всех перечисленных типов звёзд ха-

рактерна фотометрическая переменность на уровне $\simeq 0.1 - 0.2^m$. На фоне перечисленных классов LBV звезды выделяются своим высоким значением отношения светимости к массе и значительной фотометрической и спектральной переменностью. Данное диссертационное исследование преимущественно посвящено поиску и изучению LBV звёзд.

LBV звёзды - это ярчайшие ($> 10^5 L_\odot$) массивные ($M \geq 25 M_\odot$, [2]) прэволюционировавшие звёзды. Первыми открытыми LBV считаются звёзды P Cyg и η Car. Выделяют два основных типа переменности этих звёзд: гигантские вспышки амплитудой более 2.5^m , наблюдаемые на временной шкале от нескольких лет до сотен-тысяч лет, и переменность типа S Dor амплитудой $0.1-2.5^m$, наблюдаемая на временных шкалах от нескольких лет до десятилетий [3]. В спектре LBV звёзд в зависимости от температуры фотосферы наблюдаются различные линии, среди которых широкие эмиссионные линии водорода, эмиссионные линии Fe II, He I, H II, Si II, N II и многие другие, часто имеющие профили типа P Cyg. В классическом представлении LBV звёзды соответствуют короткой стадии перехода от одиночных массивных звёзд O-типа к звездам типа Вольфа-Райе или непосредственно к сверхновым [4, 5], однако, детали таких переходов неизвестны. Кроме того, существуют работы (например, [6]), где предполагается, что к феномену LBV может приводить эволюция двойных систем с обменом масс.

Исследование LBV звёзд началось с работ Д. Ч. Дункана [7] и Э. Хаббла [8, 9], в которых эти звезды обнаруживались по их фотометрической переменности. Обнаружение переменности может требовать десятки лет наблюдений, поэтому стали применяться методы, которые основываются на других наблюдательных проявлениях этих звёзд. Например, поиск LBV по их газопылевым оболочкам в инфракрасном диапазоне [10–13] применяется на близких расстояниях в Галактике, поскольку он требует высокого пространственного разрешения инфракрасных данных. Другой метод подразумевает поиск горячих (голубых) звёзд по фотометрии в ультрафиолетовом диапазоне [14]. Одним из наиболее эффективных методов является поиск $H\alpha$ -эмиссий, связанных с яркими голубыми звездами [15–17].

Звёзды, исследуемые в данной работе, обнаружены именно этим методом. Кроме того, LBV звёзды могут быть найдены по узкополосным изображениям с вычтенным континуумом в фильтрах, максимум пропускания которых соответствует линиям $H\alpha$ и $[SII]$. В данном случае отличительным признаком LBV-кандидатов от компактных областей H II и остатков сверхновых является очень низкое отношение потоков $[SII]/H\alpha$ [18].

Подтверждение статуса LBV у кандидатов представляет собой весьма трудоёмкую задачу, требующую большого количества наблюдательного времени для выявления фотометрической и спектральной переменности. На сегодняшний день известно около 40 LBV и около сотни LBV кандидатов в нашей и других галактиках, преимущественно принадлежащих Местной группе. При этом известно лишь несколько LBV и LBV-кандидатов за пределами 1 Мпк (например, [19–22]). Малое количество подтверждённых звёзд этого типа оставляет нерешёнными ряд связанных с ними проблем. В частности, нет окончательных ответов на вопросы о происхождении феномена ярких голубых переменных, их эволюционном статусе, а также связи с некоторыми другими звёздами высокой светимости. Именно поэтому поиск и изучение новых LBV звёзд, особенно в галактиках за пределами Местной группы, является актуальной задачей.

Цели и задачи

Целью данной работы является поиск и исследование ярчайших звёзд за пределами Местной группы галактик.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Отбор эмиссионных объектов–кандидатов в LBV звёзды в галактиках за пределами Местной группы на основе спектроскопических данных, полученных на телескопах БТА САО РАН и SALT (ЮАР);
2. Фотометрические измерения наиболее перспективных кандидатов по архивным оптическим данным космического телескопа имени Хабб-

ла (HST), а также архивным и новым данным наземных телескопов. Получение новых спектров кандидатов;

3. Фотометрия выделенных кандидатов с целью поиска и исследования их пылевых оболочек по имеющимся архивным инфракрасным данным, полученным на космических телескопах Spitzer и HST;
4. Получение оценки межзвёздного поглощения по наблюдаемым спектрам туманностей вблизи выделенных LBV-кандидатов;
5. Оценка фундаментальных параметров отобранных кандидатов: температуры фотосферы и болометрической светимости. Оценка масс звёзд на основе сравнения их положения на диаграмме «температура–светимость» с эволюционными треками звёзд различной массы;
6. Оценка возраста звёздного окружения выбранных LBV-кандидатов путём сравнения их положения на диаграмме «показатель цвета–звёздная величина» с нанесёнными изохронами разного возраста;

Научная новизна

Все представленные в работе результаты являются новыми и состоят в следующем:

1. В результате спектроскопических и фотометрических исследований обнаружены три новых LBV звезды и четыре LBV-кандидата в галактиках за пределами Местной группы. У двух LBV звёзд (J125057.26+410723.13 и J122809.72+440514.8) обнаружены как спектральная, так и фотометрическая переменность ($\Delta V = 1.18 \pm 0.12^m$ и $\Delta I = 0.69 \pm 0.13^m$ соответственно). Найдена сильная фотометрическая переменность ($\Delta R \approx 2^m$) у LBV звезды J122817.83+440630.8;
2. Обнаружено, что у звезды J125057.26+410723.13 наблюдается характерный для подтверждённых LBV звёзд (например, V532 из M 33 и AF

- And из M 31) вид зависимости цвета B-V от изменения блеска в полосах B и V. Эта зависимость отражает рост температуры фотосферы с уменьшением блеска звезды;
3. Обнаружена значительная фотометрическая переменность ($\Delta V = 0.88 \pm 0.09^m$) у нового LBV кандидата J004703.27-204708.4 в галактике NGC 247;
 4. На основе спектроскопии и исследовании спектральных распределений энергии обнаружены новый B[e]-сверхгигант и кандидат в B[e]-сверхгиганты в галактиках за пределами Местной группы;
 5. Для трёх новых LBV звезд, трех LBV кандидатов, B[e]-сверхгиганта и кандидата в B[e]-сверхгиганты получены оценки межзвёздного поглощения;
 6. Результаты фотометрии J122810.94+44440540.6, J122811.70+440550.9 и J122809.72+440514.8 по архивным инфракрасным данным космического телескопа им. Хаббла. Результаты фотометрии J004703.27-204708.4, J004702.18-204739.93 по архивным инфракрасным данным космического телескопа им. Хаббла и Spitzer. У объектов J122810.94+44440540.6, J004703.27-204708.4 и J004702.18-204739.93 обнаружены избытки инфракрасного излучения, источником которых в случае J004703.27-204708.4 и J004702.18-204739.93, предположительно, являются околосвёздные газопылевые оболочки;
 7. На основе спектральных распределений энергии и спектроскопии определены фундаментальные параметры всех исследуемых в работе объектов. Получены оценки температур фотосферы, болометрических светимостей и масс всех обнаруженных объектов. Для объектов из галактики NGC 247 получены оценки температуры окружающих газопылевых компонент;
 8. Показано, что комплексы звездообразования, являющиеся вероятным местом рождения исследуемых объектов в галактиках NGC 247 и

NGC 4449, включают звёзды разного возраста (до ~ 100 миллионов лет), что указывает на непрерывность процесса звездообразования. При этом возраст самых молодых звёзд составляет 5-10 миллионов лет;

Научная и практическая ценность

Результаты диссертационного исследования имеют теоретическую и практическую ценность, и могут быть использованы для изучения звёзд типа LBV и B[e]-сверхгигантов. Обнаруженные три новых LBV звезды в галактиках NGC 4736 и NGC 4449 значительно расширяют список подтверждённых LBV звёзд за пределами Местной группы галактик и дополняют общий список известных LBV звёзд, изучение которых позволит лучше понять их природу и эволюционный статус. Поиск LBV звёзд в галактиках с разной металличностью важно для исследования зависимости темпов истечения вещества от химического состава газа при условиях близости светимости звезды к пределу Эддингтона.

Основные положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Открытие трёх новых LBV звёзд на основе спектрофотометрической переменности или сильной переменности блеска ($\Delta R \gtrsim 2^m$) в галактиках NGC 4736 и NGC 4449 за пределами Местной группы. Обнаружение четырёх LBV-кандидатов в галактиках NGC 4736, NGC 247 и NGC 4449, два из которых демонстрируют фотометрическую переменность $\Delta V = 0.55 \pm 0.08^m$ и $\Delta V = 0.88 \pm 0.09^m$;
2. Обнаружение B[e]-сверхгиганта в галактике NGC 247 и кандидата в B[e]-сверхгиганты в галактике NGC 4449. В спектре B[e]-сверхгиганта наблюдаются все классификационные особенности, характерные для данного класса объектов: запрещённые линии [Fe II], [O I] и [Ca II],

а также избыток излучения в ИК диапазоне, связанный с наличием тёплой пыли. Спектральное распределение энергии кандидата характеризуется значительным вкладом свободно-свободного и свободно-связанного излучения, формирующегося в ионизированной околосвёздной оболочке;

3. Результаты исследования возрастов звёздного окружения LBV звёзд, LBV-кандидатов, В[е]-сверхгиганта и кандидата в В[е]-сверхгиганты в галактиках NGC 247 и NGC 4449. Определение величины межзвёздного поглощения для 8 обнаруженных звёзд в галактиках NGC 4736, NGC 247 и NGC 4449 на основе наблюдаемого бальмеровского декремента окружающих туманностей;
4. Результаты определения фундаментальных параметров всех обнаруженных звёзд: получены оценки температуры и болометрической светимости. Для LBV-кандидата и В[е]-сверхгиганта в галактике NGC 247 оценены температуры окружающих газопылевых оболочек.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы были представлены на различных российских и международных конференциях:

1. Международная конференция «Stars: from collapse to collapse», Нижний Архыз, 3-7.10.2016;
2. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», Москва, ИКИ РАН, 18-21.12.2017;
3. Международная конференция «Звезды, планеты и их магнитные поля», Санкт-Петербург, 17-21.09.2018 г.;
4. Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», Москва, ИКИ РАН, 18-21.12.2018;

5. Международная конференция «Physics of Stars and Planets: Atmospheres, Activity, Magnetic fields», Азербайджан, Шемаха, 16-20.09.2019;
6. Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия-2019», Нижний Архыз, 7-11.10.2019;
7. Всероссийская конференция «Наземная астрономия в России. XXI век», Нижний Архыз, 21-25.09.2020;
8. Всероссийская конференция ВАК-2021: «Астрономия в эпоху многоканальных исследований», Москва, 23-28.08.2021.

Публикации по теме диссертации

Материалы диссертации опубликованы в семи работах. Основные результаты изложены в трёх работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях.

Статьи в рецензируемых научных изданиях:

1. **Solovyeva, Y.**, Vinokurov, A., Fabrika, S., Kostenkov, A., Sholukhova, O., Sarkisyan, A., Valeev, A., Atapin, K., Spiridonova, O., Moskvitin, A., Nikolaeva, E. «New luminous blue variable candidates in NGC 4736» . Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 484, Issue 1, P. L24-L28 (2019);
2. **Solovyeva Y.**, Vinokurov A., Sarkisyan A., Atapin K., Fabrika S., Kniazev A., Sholukhova O., Maslennikova O. «New luminous blue variables candidates in the NGC 247 galaxy» Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 497, Issue 4, P. 4834-4842 (2020);
3. **Solovyeva Y.**, Vinokurov A., Sarkisyan A., Kostenkov A., Atapin K., Oparin D., Moiseev A., Fabrika S. «Search for LBVs in the Local Volume galaxies: study of four stars in NGC 4449», Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 507, Issue 3, P. 4352-4366 (2021);

Статьи по материалам конференций:

4. **Solovyeva Y. N.**, Vinokurov A. S., Fabrika S. N., Sarkisyan A. N., Sholukhova O. N., Nikolaeva E. A. «NEW LBV CANDIDATES IN NGC 247 GALAXY», *Astronomical Journal of Azerbaijan*, Vol.15 No.1, P. 192 (2020);
5. **Solovyeva Y.**, Vinokurov A., Kostenkov A., Sarkisyan A., Atapin K., Valeev A. «New data for the LBV in NGC 4736», *Astronomical and Astrophysical Transactions*, Vol.32, accepted (2020);
6. **Solovyeva, Y. N.**, Vinokurov, A. S., Atapin, K. E., Oparin, D. V., Valeev, A. F., Fabrika, S. N. «Search for Massive Stars in NGC4449». *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Proceedings of the All-Russian Conference held 21-25 September, 2020 in Nizhny Arkhyz, Russia*. Edited by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, D. O. Kudryavtsev, P. 100-101 (2020);
7. **Solovyeva, Y. N.**, Fabrika, S. N., Vinokurov, A. S., Sholukhova, O. N., Valeev, A. F. «Emission Objects in Young Stellar Clusters», *Stars: From Collapse to Collapse, Proceedings of Astronomical Society of the Pacific*, P. 58-59 (2017);

Личный вклад автора

Автор работы принимал активное участие в подготовке программ наблюдений и на телескопах CAO РАН и SALT, а также в наблюдениях на БТА. Автор также является заявителем наблюдательных программ «Новые кандидаты в LBV в близких галактиках» на телескопе БТА и «Фотометрия LBV-кандидатов» на телескопе Цейсс-1000. Первичная обработка спектроскопических и фотометрических наблюдательных данных, проведение всех фотометрических измерений выполнены автором. Во всех работах автор внёс равноценный вклад в обсуждение результатов, а также определяющий вклад в подготовке статей к публикации.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит введения, четырёх глав, заключения и списка цитированной литературы из 158 наименований, содержит 134 страниц текста, включая 42 рисунок и 10 таблиц.

Во Введении представлен обзор литературных данных по ярким голубым переменным. Он включает в себя следующую информацию: краткий исторический обзор исследований звёзд этого типа; информацию о различных методах поиска LBV-звёзд в нашей и близких галактиках; описание наблюдательных проявлений LBV, включая описание типов фотометрической переменности, спектральные особенности и распределение энергии в спектрах; обсуждение эволюционного статуса ярких голубых переменных и возможных механизмов переменности типа S Dor; описание явления импосторов сверхновых и их связь с LBV-звёздами, а также описание других типов массивных звёзд, таких как B[e]-сверхгиганты, жёлтые сверхгиганты, тёплые гипергиганты, и их возможной эволюционной связи с яркими голубыми переменными. Кроме того, во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы её цели и задачи, научная новизна, положения, выносимые на защиту и научная и практическая значимость. Также приведены апробация результатов и список публикаций, содержащих основные результаты диссертации.

Первая глава посвящена наблюдательным данным и их обработке. Объекты для исследования были выделены сотрудниками Лаборатории Физики Звёзд САО РАН. Отбор производился по архивным изображениям галактик за пределами Местной группы, полученных на космическом телескопе им. Хаббла с использованием широкополосных фильтров и узкополосных фильтров, пропускающих излучение в линии H α на соответствующих красных смещениях. В результате отбора были выделены 177 точечных источников с избытком излучения в линии H α в галактиках северной полушеры и около 300 объектов в южной полушере. Спектроскопия на телескопах BTA/SCORPIO и SALT/RSS (ЮАР) была проведена

для 141 объекта северной и 91 объекта южной полусфер. Анализ спектральных данных позволил выделить 50 объектов, которые показывают спектральные особенности, присущих звёздам типа LBV. Спектры некоторых из наиболее перспективных LBV-кандидатов северного неба были повторно получены на телескопе БТА. В диссертации представлены результаты изучения девяти LBV-кандидатов в галактиках NGC 4736, NGC 247 и NGC 4449, описание которых также приведено в разделе 1.1. В разделе 1.2 описаны методы и приборы, которые использовались во время наблюдений. В разделе 1.3 представлены основные этапы обработки спектральных данных, а также особенности обработки спектров, полученных на SALT и Subaru. В этом разделе также описан алгоритм экстракции спектров объектов, находящихся в тесных звёздных полях. Раздел 1.4 содержит описание обработки фотометрических данных космических и наземных телескопов. Описаны методы фотометрии, применяемые в работе, в частности методы апертурной и PSF фотометрии, а также особенности фотометрических измерений отдельных объектов.

Во второй главе изложены результаты фотометрии и спектроскопии исследуемых кандидатов в галактиках NGC 4736, NGC 247 и NGC 4449. Спектры всех кандидатов показывают широкие компоненты линий водорода и эмиссионные линии Fe II и [Fe II], а также множество эмиссионных линий, характерных для звёзд типа LBV. Некоторые спектральные линии (например, линии водорода, He I, Fe II), наблюдаемые в спектрах J125055.84+410625.44, J004703.27-204708.4 и J122809.72+440514.8, имеют профили типа P Cyg. На основе измерения FWHM запрещённой линии азота [N II] $\lambda 5755$, формирующейся в удалённых частях звёздного ветра, получена оценка терминальной скорости ветра J004703.27-204708.4 $V_\infty = 464 \pm 26 \text{ km/s}^{-1}$. В спектре кандидата J004702.18-204739.93 обнаружены запрещённые линии [Ca II] $\lambda\lambda 7291, 7324$ и [O I] $\lambda\lambda 6300, 6364$, указывающие на присутствие околозвёздной оболочки и наблюдаемые в спектрах B[e]-сверхгигантов. По данным БТА/SCORPIO выявлена спектральная переменность некоторых объектов. В частности, спектр объек-

та J125057.26+410723.13 показал значительное уменьшение эквивалентных ширин линий железа Fe II с 2015 по 2018 годы, что сопровождалось падением блеска $\Delta V \approx 1^m$. В разделе 2.1 описан метод оценки межзвёздного поглощения, в котором используется отношение потоков в линиях водорода бальмеровской серии окружающих объекты туманностей, и приведены результаты определения межзвёздного поглощения с применением этого метода для всех объектов за исключением J125055.84+410625.44, вокруг которого туманность не обнаружена.

Во второй главе также представлены и результаты фотометрических измерений изучаемых источников по данным наземных и космических телескопов. Значительное изменение блеска выявлено у кандидата J125057.26+410723.13: $\Delta V = 1.18 \pm 0.12^m$ и $\Delta B = 0.90 \pm 0.12^m$ с 2005 по 2018 годы. Наблюдаемый у J125057.26+410723.13 вид зависимости цвета ($B - V$) от изменения блеска в фильтрах B и V характерен для подтверждённых LBV звёзд [23]. Кандидат J125055.84+410625.44 также показал фотометрическую переменность: $\Delta B = 0.43 \pm 0.07^m$ и $\Delta V = 0.55 \pm 0.08^m$ с 2014 по 2018 годы. Фотометрия объекта J004703.27-204708.4 выявила значительную переменность его блеска: яркость в полосах B и V упала на $\Delta B = 0.74 \pm 0.09^m$ и $\Delta V = 0.88 \pm 0.09^m$ с 2005 по 2011, после чего объект начал испытывать поярчание ($\Delta V = 0.34 \pm 0.10^m$ с 2011 по 2018 годы). Наибольшую фотометрическую переменность показал кандидат J122817.83+440630.8: поярчание в полосе R составило $\Delta R = 2.15 \pm 0.13^m$ с 1995 по 2001 годы, после чего к 2020 году звезда вернулась в прежнее состояние яркости. Также изменения блеска прослеживаются и у кандидата J122809.72+440514.8: $\Delta U = 0.28 \pm 0.24^m$, $\Delta V = 0.48 \pm 0.14^m$, $\Delta I = 0.69 \pm 0.13^m$ с 1997 по 2020 годы. У остальных изучаемых объектов зарегистрирована переменность блеска в пределах 0.3^m . Результаты главы опубликованы в работах [1,2,3,4], [6].

Третья глава посвящена определению параметров изучаемых звёзд, а также их спектральной классификации. В зависимости от имеющихся данных для оценки температуры фотосфер применялись разные мето-

ды. Например, температура фотосферы кандидатов J125057.26+410723.13, J125055.84+410625.44, J125103.35+410635.37 по наблюдаемым спектральным линиям оценена как $T = 18000 \pm 3000$ К, 15000 ± 3000 К и 12000 ± 2000 К, соответственно. Для объектов из галактики NGC 4736 имеется ограниченный набор фотометрических данных в полосах В и V, поэтому температура фотосферы J125057.26+410723.13 и J125103.35+410635.37 оценивалась также путём определения нормального цвета $(B - V)_0$, в результате чего получены значения 17000 ± 3000 К для J125057.26+410723.13 и 9300 ± 1000 К для J125103.35+410635.37. Поскольку оценка межзвёздного поглощения для J125055.84+410625.44 отсутствует, определить значение его нормального цвета $(B - V)_0$ и температуры фотосферы не удалось. Оценки болометрических светимостей составили $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.5 \pm 0.2$ для J125057.26+410723.13, $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) > 5.9$ для J125055.84+410625.44, $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 5.3 \pm 0.2$ для J125055.84+410625.44, соответственно.

Для остальных кандидатов имелись фотометрические данные в широком диапазоне длин волн, поэтому была возможность анализировать спектральные распределения энергии (SED) объектов. Путём аппроксимации SED объектов J004703.27-204708.4 и J004702.18-204739.93 чернотельной функцией получена более точная оценка температур фотосферы $T = 18000 \pm 2000$ К и $T = 15000 \pm 2000$ К соответственно. В SED обоих объектов присутствуют избытки излучения в ближнем ИК диапазоне, которые, вероятно, связаны с излучением газопылевых околозвёздных оболочек, и их температура была оценена как $T_{\text{dust}} \approx 1400$ К для J004703.27-204708.4 и $T_{\text{dust}} \approx 1300$ К для J004702.18-204739.93. Оценки болометрических светимостей кандидатов J004703.27-204708.4 и J004702.18-204739.93 составили $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.11_{-0.16}^{+0.20}$ и $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.24_{-0.25}^{+0.20}$, соответственно.

Температуры фотосферы кандидатов в галактике NGC 4449 и их светимости также оценивались на основе SED: для J122810.94+440540.6 оценки температуры и светимости составили $T_{\text{SED}} = 10000 \pm 500$ К и $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 5.76 \pm 0.09$; для J122811.70+440550.9 – $T_{\text{eff}} = 20800 \pm 4500$ К

и $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 5.88 \pm 0.44$; для «горячего» и «холодного» состояний температуры составляют J122817.83+440630.8 $T_{\text{SED}} = 19000 \pm 1200$ К и $T_{\text{SED}} = 9000 \pm 600$ К, а оценка светимости $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 5.12 \pm 0.15$.

Аппроксимация чернотельным законом спектрального распределения энергии J122809.72+440514.8 в «горячем» состоянии дало оценки $T_{\text{eff}} = 13500 \pm 4300$ К и $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.44 \pm 0.64$. В «холодном» состоянии объект демонстрирует глубокий бальмеровский скачок, поэтому указанный выше метод определения параметров по SED не даёт удовлетворительных результатов. В данном случае использовался код CMFGEN [24] для расчёта модели атмосферы звезды, что дало оценки температуры фотосферы $T_{\text{eff}} = 9300$ К и темпа потери массы $\dot{M} = 5.2 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, при этом болометрическая светимость определялась из аппроксимации наблюдаемого SED в «холодном» состоянии полученным модельным спектром с учётом межзвездного поглощения: $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.41 \pm 0.03$ при значении $A_V = 1.05 \pm 0.07^m$.

В разделе 3.2 обсуждается положение исследуемых звёзд на диаграмме «температура–светимость» и приводится оценка начальных масс объектов, полученная из сравнения положений с теоретическими эволюционными треками для массивных звёзд.

В разделе 3.3 предложена спектральная классификация объектов. По наблюдаемым характеристикам и полученным оценкам светимости объекты были классифицированы следующим образом: J125057.26+410723.13, J122817.83+440630.8 и J122809.72+440514.8 были отнесены к типу LBV звёзд; J004702.18-204739.93 и J122811.70+440550.9 классифицированы как V[e]-сверхгигант и кандидат в V[e]-сверхгиганты; J125055.84+410625.44, J125103.35+410635.37, J004703.27-204708.4 и J122810.94+440540.6 остаются в качестве LBV-кандидатов, и их более точная классификация требует дополнительных исследований и наблюдений. Результаты данной главы опубликованы в работах [1,2,3].

В **четвёртой** главе представлены результаты оценки возраста звёздного окружения кандидатов в галактиках NGC 247 и NGC 4449. Диаграммы

«цвет – звёздная величина», построенные для областей звездообразования вблизи кандидатов, показывают признаки непрерывного звездообразования в них. Отмечено, что положение большего числа звёзд в выбранных областях в галактике NGC 247 хорошо описывается изохронами с возрастом 10-30 млн. лет. Непрерывное звездообразование (либо несколько эпизодов звездообразования) в областях в NGC 4449 наблюдается в течение, по крайней мере, последних 100 млн. лет. При этом положение самых молодых звёзд, включая объекты J122810.94+440540.6, J122811.70+440550.9 и J122817.83+440630.8, хорошо согласуется с изохронами возраста 5-10 млн. лет. Кандидаты J004703.27-204708.4, J004702.18-204739.93 и J122809.72+440514.8 оказались расположенными заметно выше остальных звёзд на диаграмме, для чего были предложены две интерпретации: 1) В виду малой населённости верхней части диаграмм вероятна переоценка возраста звёзд выбранных областей; 2) Объекты J004703.27-204708.4, J004702.18-204739.93 и J122809.72+440514.8 имеют возраст порядка 10 млн. лет, но являются результатом эволюции тесных двойных звёзд с обменом масс, в результате чего были «омоложены». Результаты данной главы опубликованы в работах [2,3].

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

В списке литературы перечислены публикации, цитируемые в текущей работе.

Список литературы

- [1] 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.
- [2] On the Social Traits of Luminous Blue Variables / Roberta M. Humphreys, Kerstin Weis, Kris Davidson, Michael S. Gordon // *ApJ*. — 2016. — Jul. — Vol. 825, no. 1. — P. 64. — 1603.01278.
- [3] van Genderen A. M. S Doradus variables in the Galaxy and the Magellanic Clouds // *A&A*. — 2001. — Feb. — Vol. 366. — P. 508–531.
- [4] The evolution of massive stars and their spectra. I. A non-rotating 60 M star from the zero-age main sequence to the pre-supernova stage / Jose H. Groh, Georges Meynet, Sylvia Ekström, Cyril Georgy // *A&A*. — 2014. — Apr. — Vol. 564. — P. A30. — 1401.7322.
- [5] 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.
- [6] Smith Nathan, Tombleson Ryan. Luminous blue variables are antisocial: their isolation implies that they are kicked mass gainers in binary evolution // *MNRAS*. — 2015. — Feb. — Vol. 447, no. 1. — P. 598–617. — 1406.7431.
- [7] 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.
- [8] Hubble E. P. A spiral nebula as a stellar system: Messier 33. // *ApJ*. — 1926. — May. — Vol. 63. — P. 236–274.
- [9] Hubble E. P. A spiral nebula as a stellar system, Messier 31. // *ApJ*. — 1929. — Mar. — Vol. 69. — P. 103–158.

- [10] MN112: a new Galactic candidate luminous blue variable / V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, S. Fabrika et al. // MNRAS. — 2010. — Jun. — Vol. 405, no. 1. — P. 520–524. — 0912.5080.
- [11] Gvaramadze V. V., Kniazev A. Y., Fabrika S. Revealing evolved massive stars with Spitzer // MNRAS. — 2010. — Jun. — Vol. 405, no. 2. — P. 1047–1060. — 0909.0458.
- [12] Gvaramadze V. V., Kniazev A. Y., Berdnikov L. N. Discovery of a new bona fide luminous blue variable in Norma // MNRAS. — 2015. — Dec. — Vol. 454, no. 4. — P. 3710–3721. — 1509.08931.
- [13] Kniazev A. Y., Gvaramadze V. V., Berdnikov L. N. MN48: a new Galactic bona fide luminous blue variable revealed by Spitzer and SALT // MNRAS. — 2016. — Jul. — Vol. 459, no. 3. — P. 3068–3077. — 1604.03942.
- [14] The UV-brightest Stars of M33 and Its Nucleus: Discovery, Photometry, and Optical Spectroscopy / Philip Massey, Luciana Bianchi, John B. Hutchings, Theodore P. Stecher // ApJ. — 1996. — Oct. — Vol. 469. — P. 629.
- [15] 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.
- [16] Valeev A. F., Sholukhova O. N., Fabrika S. N. Search for LBV candidates in the M33 galaxy // Astrophysical Bulletin. — 2010. — Apr. — Vol. 65, no. 2. — P. 140–149. — 1007.5383.
- [17] Corral L. J. LBV-Type Stars in M33 // AJ. — 1996. — Oct. — Vol. 112. — P. 1450.
- [18] King N. L., Walterbos R. A. M., Braun R. Discovery of Candidate Luminous Blue Variables in M31 // ApJ. — 1998. — Nov. — Vol. 507, no. 1. — P. 210–220.

- [19] The extremely metal-poor galaxy DDO 68: the luminous blue variable, H α shells and the most luminous stars / S. A. Pustilnik, L. N. Makarova, Y. A. Perepelitsyna et al. // MNRAS. — 2017. — Mar. — Vol. 465, no. 4. — P. 4985–5002. — 1611.08489.
- [20] Luminous and Variable Stars in NGC 2403 and M81 / Roberta M. Humphreys, Sarah Stangl, Michael S. Gordon et al. // AJ. — 2019. — Jan. — Vol. 157, no. 1. — P. 22. — 1811.06559.
- [21] Drissen Laurent, Roy Jean-René, Robert Carmelle. A New Luminous Blue Variable in the Giant Extragalactic H II Region NGC 2363 // ApJ. — 1997. — Jan. — Vol. 474, no. 1. — P. L35–L38.
- [22] SN2015bh in NGC 2770: LBV core collapse in merging of binary system components / V. P. Goranskij, E. A. Barsukova, A. F. Valeev et al. // Astrophysical Bulletin. — 2016. — Oct. — Vol. 71, no. 4. — P. 422–435.
- [23] Spectral variability of LBV star V 532 (Romano’s star) / O. N. Sholukhova, S. N. Fabrika, A. V. Zharova et al. // Astrophysical Bulletin. — 2011. — Apr. — Vol. 66, no. 2. — P. 123–143. — 1105.0123.
- [24] Hillier D. John, Miller D. L. The Treatment of Non-LTE Line Blanketing in Spherically Expanding Outflows // ApJ. — 1998. — Mar. — Vol. 496, no. 1. — P. 407–427.

Соловьева Юлия Николаевна

Ярчайшие звёзды за пределами Местной группы галактик

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

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

Типография _____