

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

УДК 524.338-126/54

ВАЛЕЕВ Азамат Фанилович

**Поиск и исследование массивных звезд на
финальных стадиях эволюции в галактиках
Треугольник и Млечный Путь**

Специальность: 01. 03. 02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз – 2010

Работа выполнена в Специальной Астрофизической Обсерватории
Российской Академии Наук.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
профессор

С. Н. Фабрика
(САО РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор

Ю. Н. Гнедин
(ГАО РАН)

г. Санкт-Петербург

кандидат физико-математических наук

С. А. Пустильник
(САО РАН)

пос. Ниж. Архыз

Ведущая организация:

Казанский (Приволжский) Федеральный Университет

г. Казань

Защита состоится 15 октября 2010 г. в 11 часов на
заседании диссертационного совета Д 02.203.01 при Специальной
Астрофизической Обсерватории Российской академии наук
по адресу: 369167, САО РАН, п. Нижний Архыз,
Карачаево-Черкесская республика, Россия

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан 8 сентября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук

Е. К. Майорова

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Изучение массивных звезд является одной из наиболее актуальных задач современной астрофизики. Влияние массивных звезд на эволюцию галактик значительно. Ультрафиолетовое излучение массивных звезд нагревает пыль, при вспышках сверхновых и ветрами таких звезд в галактику поставляется механическая энергия, тяжелые элементы, которые определяют химическую эволюцию галактик.

Стадия Голубых Ярких Переменных (Luminous Blue Variables, LBV) в эволюции массивных звезд наименее изучена, но наиболее важна и интересна [1]. Звезды LBV характеризуются высокой болометрической светимостью (их светимость близка или превышает критическую или эддингтоновскую светимость), неправильной переменностью блеска и гигантскими извержениями. Прототипами звезд класса LBV являются η Car и P Cyg в нашей Галактике. Предполагается, что η Car находится на такой стадии, что в обозримое время может взорваться как сверхновая.

Однако, большинство звезд LBV-класса пока не показывали гигантских извержений. Во время визуального минимума блеска таких звезд ("горячие LBV") максимум излучения смещается в ультрафиолетовую область. А во время визуального максимума блеска ("холодные LBV"), когда максимум излучения находится в видимом диапазоне, наблюдается резкое повышение темпа потери массы, скорость ветра уменьшается до 100–200 км/с. В относительно спокойном состоянии ("спящие LBV") эти звезды могут быть подобны звездам WNL и не показывать значительных изменений блеска, трудно доказать, что данные звезды принадлежат классу LBV. Например, классические LBV-звезды P Cyg и η Car сейчас находятся в спокойном состоянии

и при современных обзорах в нашей Галактике, скорее всего, они не были бы заподозрены в принадлежности классу LBV-звезд. Более того, если бы они находились в близких галактиках М 31 или М 33, они вообще не были бы обнаружены.

За 40 лет наблюдений Э. Хаббл и А. Сендидж открыли в галактиках М 31 и М 33 всего пять LBV-звезд [2], изучив их неправильную переменность. Сейчас в нашей Галактике и всей Местной Группе галактик известно не более 20 подтвержденных LBV-звезд, кроме этого к кандидатам в LBV-звезды отнесены около 70 объектов [3, 4].

Галактики Местной Группы, разрешаемые на отдельные звезды, являются замечательными лабораториями для исследования массивного звездного населения в них. Так как металличности галактик в Местной Группе изменяются от $0.3 Z_{\odot}$ до $4 Z_{\odot}$, то можно изучать влияние металличности и морфологического типа галактики на эволюцию массивных звезд.

При поиске статистических закономерностей и исследовании эволюции массивных звезд по диаграмме температура – светимость для LBV-звезд нашей Галактики существует большая неопределенность в светимости, которая связана с неопределенностью в расстоянии. Кроме того, значительную неопределенность вызывают неточное знание величин межзвездного поглощения света в пыли Галактики. Для звезд в галактиках Местной Группы, расстояние до которых хорошо определено, а величина поглощения в направлении на данную галактику также хорошо измерена, положение на диаграмме температура – светимость фиксируется существенно более точно. По этой причине исследования массивных звезд в галактиках Местной Группы могут быть чрезвычайно плодотворными.

В поиске LBV-звезд в галактиках Местной Группы в последнее время наметились определенные сдвиги. Многочисленные попытки найти эмиссионные объекты типа SS 433 [5, 6], поиск ультрафиолетовых источников [7], а

также полные фотометрические обзоры всего звездного населения галактик Местной Группы [8] выявили большое количество кандидатов в массивные звезды на финальных стадиях эволюции. Только кардинальное расширение выборки LBV-звезд и кандидатов в LBV-звезды позволит понять статистические свойства объектов этого класса, а также эволюцию массивных звезд в целом. Пусть даже некоторые из вновь найденных объектов впоследствии будут исключены из LBV-класса.

В нашей Галактике массивные звезды на финальных стадиях эволюции можно обнаружить по оболочкам вокруг звезд на инфракрасных изображениях [9]. Таким образом в Галактике недавно были открыты новая LBV-звезда [10] и две звезды Wolf-Rayet редкого типа WN8-9h и WN7h [11, 12].

Современные обзоры галактик Местной Группы в инфракрасном диапазоне с высоким пространственным разрешением (орбитальная обсерватория Spitzer) позволяют более детально изучать спектральные распределения энергий для вновь отобранных кандидатов, выявляя наличие околозвездной оболочки, следы недавних выбросов вещества в межзвездную среду и даже переменность объектов в этом диапазоне. Многочисленные программы по поиску переменных звезд в разных галактиках с использованием широкоформатных ПЗС-матриц или мозаик из них, с возможностью фиксировать изменения звездной величины с амплитудой менее 0^m1 , дают уникальную возможность выявлять даже "спящие" LBV. Расширение списка известных LBV-звезд, их изучение и попытки понять физическую природу LBV-феномена становится возможным на современном этапе развития наблюдательной и теоретической базы. Все это обеспечивает актуальность темы диссертации.

Цель работы

Целью предпринимаемого в диссертации исследования является:

- на основе фотометрических изображений, полученных в рамках проекта "Исследование звездного населения в разрешаемых на отдельные звезды галактиках Местной Группы" [8], отобрать эмиссионные объекты – кандидаты в массивные звезды на финальных стадиях эволюции в галактике М 33;
- провести кросс-идентификацию выбранных кандидатов с объектами из других крупных обзоров галактики М 33;
- провести спектроскопию кандидатов в массивные звезды на финальных стадиях эволюции с целью подтверждения их эмиссионной природы, а также изучить спектры наиболее интересных объектов;
- на инфракрасных изображениях, полученных на космическом телескопе Spitzer, выполнить фотометрические измерения для наиболее интересных кандидатов, с целью выявления их пылевой активности;
- изучить однородным методом все ранее известные LBV-звезды, а также вновь найденные кандидаты в LBV в галактике М 33. По спектрам этих объектов оценить величину межзвездного поглощения. По спектральному распределению энергии при известном значении межзвездного поглощения определить температуру и светимость звезд и их пылевых компонент. По диаграмме температура – светимость, используя модельные расчеты эволюции звезд разных масс, определить массы звезд;
- провести детальную спектроскопию звезд в нашей Галактике, выделенных на основе поиска объектов с круговыми оболочками на инфракрасных изображениях Spitzer, с целью классификации этих звезд. Выполнить фотометрические измерения для этих звезд на инфракрасных изображениях, полученных на космическом телескопе Spitzer.

Научная новизна работы

Все основные результаты работы являются новыми и состоят в следующем:

1. На основе ПЗС-изображений галактики М 33 проведен поиск звезд с $H\alpha$ -эмиссией с пределом до $V < 18^m.5$. В результате впервые был составлен наиболее полный каталог кандидатов в массивные звезды на финальных стадиях эволюции, поскольку даже с учетом возможного межзвездного покраснения он содержит все сверхгиганты классов светимости Iab и ярче, а также наиболее горячие сверхгиганты класса светимости Ib (со спектрами B0 и ранее). Каталог содержит 185 голубых и 25 покраснённых объектов, предположительно испытывающих заметное межзвездное покраснение;
2. В результате кросс-идентификации нашего каталога с каталогами рентгеновских, ультрафиолетовых, переменных объектов в галактике М 33 было показано, что 29% являются переменными и 15% – ультрафиолетовыми источниками;
3. Проведена спектроскопия 49 голубых и 17 покраснённых объектов на 6-м телескопе БТА;
4. В результате спектроскопии обнаружены новая LBV-звезда и два новых LBV-кандидата в галактике М 33. Детально изучены спектры этих объектов;
5. На инфракрасных изображениях, полученных на космическом телескопе Spitzer, выполнены фотометрические измерения для всех классических LBV-звезд, новой LBV-звезды и двух LBV-кандидатов в галактике М 33;

6. Впервые для LBV-звезд применен метод оценки межзвездного поглощения по бальмеровскому декременту окружающих звезды H II-областей;
7. На основе спектральных распределений энергии определены фундаментальные параметры всех классических LBV-звезд, новой LBV-звезды и двух LBV-кандидатов в галактике M 33. Найдены температуры, светимости, массы, радиусы звезд, а также температуры и светимости окружающих их пылевых компонент. Сделан вывод о спорадической природе пылевой активности, которая возникает, вероятно, вследствие мощных выбросов вещества;
8. Проведена оптическая спектроскопия двух звезд Галактики, выделенных на основе поиска объектов с круговыми оболочками на инфракрасных изображениях Spitzer. Обнаружено, что они являются объектами редкого класса WNL. Изучены спектры этих звезд, на основе моделирования определены фундаментальные параметры этих звезд;
9. На инфракрасных изображениях, полученных на космическом телескопе Spitzer, выполнены фотометрические измерения для двух новых WNL-звезд Галактики. Построено спектральное распределение энергии в широком диапазоне длин волн ($3000\text{\AA} - 70\mu m$).

Теоретическая и практическая значимость

Результаты диссертации имеют как практическую, так и теоретическую ценность. В **главе 1** проведен отбор кандидатов в массивные звезды на финальных стадиях эволюции. Составлен новый каталог, который является на текущий момент самым полным, включающим все сверхгиганты галактики M 33. Изучение спектров этих объектов позволит изучить массивное звездное

население во всей галактике М 33.

Обнаруженные новая LBV-звезда (седьмая в М 33) и два LBV-кандидата, спектры и переменность которых описываются в **главе 2**, расширяют список известных LBV-звезд, более подробное изучение которых в будущем позволит понять природу LBV-феномена.

Определенные в **главе 3** единым методом фундаментальные параметры LBV-звезд галактике М 33 (светимости, температуры, массы, радиусы и величины межзвездного поглощения, параметры пылевых оболочек) позволяют оценить влияние металличности и окружения на LBV-феномен. Однако, на данный момент малое количество подобных объектов, известных в астрофизике, еще не позволяет уверенно делать выводы об эволюции массивных звезд.

Обнаружение и спектральное исследование двух звезд редкого класса WNL, описанное в **главе 4**, определение металличности их ветров, содержание водорода позволит понять связь между WNL и LBV.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Список звезд с эмиссией в линии $H\alpha$ – кандидатов в массивные звезды на финальных стадиях эволюции в галактике М 33. Список содержит 185 голубых и 25 покраснённых объектов, предположительно испытывающих межзвездное поглощение света в галактике М 33;
2. Открытие новой LBV-звезды из нашего списка голубых объектов и двух кандидатов в LBV-звезды из списка покраснённых объектов в галактике М 33;
3. Определение фундаментальных параметров всех известных классиче-

ских LBV-звезд, новой LBV-звезды и двух новых кандидатов в LBV-звезды в галактике М 33. Определены температуры, светимости, массы, радиусы и величины межзвездного поглощения этих звезд, а также температуры и светимости окружающих их пылевых оболочек;

4. Результаты оптической спектроскопии и инфракрасной фотометрии двух новых WNL-звезд в нашей Галактике, отобранных на основе инфракрасных изображений космического телескопа Spitzer.

Апробация работы

Результаты работ обсуждались на семинарах Специальной астрофизической обсерватории РАН, на кафедре астрономии университета г. Оулу (Финляндия) и на кафедре астрономии Казанского (Приволжского) Федерального Университета. Результаты докладывались на следующих конференциях:

1. "Астрономия и астрофизика начала XXI века"; Москва, 1-6 июля 2008 г.
2. "Star Formation from Spitzer (Lyman) to Spitzer (Telescope) and Beyond"; Vienna, Austria, 10-12 сентября 2008 г.
3. "The Third NEON Archive Observing school"; ESO, Garching, Germany, 27 августа - 6 сентября 2008 г.
4. "The multi-wavelength view of Hot, Massive Stars"; Liege, Belgium, 12-16 июля 2010 г.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 статьях общим объемом 45 страниц. Все статьи опубликованы в рецензируемых журналах.

1. A. F. Valeev, O. Sholukhova, S. Fabrika; "A new luminous variable in M 33"; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society; 2009, v. 396, p. L21
2. V. V. Gvaramadze, S. Fabrika, W.-R. Hamann, O. Sholukhova, A. F. Valeev, V. P. Goranskij, A. M. Cherepashchuk, D. J. Bomans, L. M. Oskinova; "Discovery of a new Wolf-Rayet star and its ring nebula in Cygnus"; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society; 2009, v. 400, p. 524
3. А. Ф. Валеев, О. Н. Шолухова, С. Н. Фабрика; "Поиск LBV кандидатов в галактике М 33"; Астрофизический бюллетень, 2010, v. 65, p. 140 (arXiv:1007.5383)
4. V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, W.-R. Hamann, L. N. Berdnikov, S. Fabrika, A. F. Valeev; "New Wolf-Rayet star and its circumstellar nebula in Aquila"; Monthly Notices of the Royal Astronomical Society; 2010, v. 403, p. 760
5. А. Ф. Валеев, О. Н. Шолухова, С. Н. Фабрика; "Два новых LBV-кандидата в галактике М 33"; Астрофизический бюллетень, 2010, принята к печати (arXiv:1009.1165)

Личный вклад автора

Во всех работах спектральные данные на телескопе БТА были получены автором. Автором были проведены фотометрические измерения на оптических изображениях, полученных на 4 м телескопах НОАО и СТЮ, и на инфракрасных изображениях, полученных на космическом телескопе Spitzer. В работах [1,3,5] автор внес равный вклад в обсуждение результатов всей работы. В работах [2,4] автором измерены инфракрасные потоки и получены спектральные распределения энергии.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка цитированной литературы из 75 наименований, содержит 120 страниц машинописного текста, включая 26 рисунков и 9 таблиц.

Краткое содержание диссертации

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели исследования, а также положения выносимые на защиту. Кратко изложены структура и содержание работы, дается характеристика научной новизны и практической ценности полученных результатов.

В первой главе представлен каталог кандидатов в массивные звезды на финальных стадиях эволюции в галактике М 33. Отбор был выполнен на основе оптических изображений, полученных в рамках проекта "Изучение разрешаемого на отдельные звезды населения в близких галактиках", выполненного по руководством Ф. Массея. На изображениях в 4 широких UBVR и узком $H\alpha$ фильтрах были выполнены фотометрические измерения для 2304 звезд в галактике М 33 с $V < 18^m.5$. По критерию наличия эмиссионной линии $H\alpha$ были составлены каталоги 185 голубых звезд с $(B - V) < 0^m.35$ и 25 красных звезд с $0^m.35 < B - V < 1^m.2$, предположительно испытывающих заметное межзвездное покраснение в самой галактике М 33. С учетом модуля расстояния до галактики М 33, равного $24^m.9$, и возможного межзвездного поглощения ($A_V \sim 1^m.0$) было найдено, что каталог содержит все яркие сверхгиганты классов светимости Ia_b и ярче, и наиболее горячие сверхгиганты (со спектрами B0 и ранее) класса Ib. Таким образом в первой главе представлен наиболее полный список кандидатов в массивные звезды на финальных стадиях эволюции в галактике М 33.

Была проведена кросскорреляция координат отобранных объектов с другими каталогами с целью кроссидентификации. Было показано, что 12% объектов отождествляются с ультрафиолетовыми источниками, 29% – с переменными звездами.

В данной главе также представлен обзор роли массивных звезд на финальных стадиях эволюции и в частности стадии ярких голубых переменных в астрофизике. Описываются наблюдаемые свойства LBV-звезд, методы и результаты предыдущих поисков подобных объектов в галактике М 33. Результаты первой главы опубликованы в работе [3].

Во второй главе описывается обнаружение и исследование новой (седьмой) LBV-звезды N 93351 и двух новых LBV-кандидатов N 45901 и N 125093 в галактике М 33.

В разделе 2.1 был проведен детальный анализ спектра объекта N 93351, полученного на телескопе БТА. На спектре выявлены многочисленные эмиссионные линии Fe II и [Fe II], а также водородные линии с широкими крыльями. Наличие широких компонент линий $H\alpha$ и $H\beta$, полуширины которых равны соответственно 800 км/с и 950 км/с, указывают на наличие расширяющихся пылевых оболочек вокруг звезд. Линии [Ca II] $\lambda\lambda 7291, 7323$ также говорят в пользу пылевой активности звезды и указывают на недавние выбросы вещества в межзвездную среду. По бальмеровскому декременту линий туманности, окружающей звезду, оценено межзвездное поглощение ($A_V \approx 1^m 0$), а по спектральным деталям – температура фотосферы звезды. На основе архивных измерений построена кривая переменности блеска, из которой следует амплитуда переменности блеска не менее $\sim 0^m 4$ в полосе V. На основе спектрального распределения энергии определена болометрическая светимость звезды ($\lg L/L_\odot = 6.27$). В результате объект N 93351 был классифицирован как LBV-звезда.

В разделе 2.2 был проведен анализ спектров двух новых LBV-кандидатов

N 45901 и N 125093, полученных на телескопе БТА, и выполнен гаусс-анализ профилей водородной линии $H\alpha$. Заподозрена оптическая переменность обоих объектов на основе фотометрических измерений из разных каталогов.

На инфракрасных изображениях, полученных на космическом телескопе *Spitzer*, проведены фотометрические измерения в полосах 3.6, 4.5, 5.8 и 8.0 μm для всех трех звезд, на основе которых выявлено наличие инфракрасных избытков у изучаемых объектов. Кроме этого, найдена переменность новой LBV-звезды N 93351 в инфракрасном диапазоне. Результаты второй главы опубликованы в работах [1] и [5].

В третьей главе определены фундаментальные параметры для всех шести классических LBV-звезд, новой LBV-звезды и двух новых LBV-кандидатов в галактике М 33. Исследование было выполнено по единой методике, что особенно важно для таких переменных объектов. Для каждой звезды по балмеровскому декременту линий туманности вокруг объекта оценена величина межзвездного поглощения.

Используя измеренные нами инфракрасные потоки в полосах 3.6, 4.5, 5.8 и 8.0 μm (*Spitzer*), инфракрасные данные из каталогов 2MASS-обзора и оптическую фотометрию из различных источников, были построены спектральные распределения энергии в широком диапазоне длин волн (3000–80000 \AA) для каждого объекта. Показано, что у многих объектов в инфракрасном диапазоне наблюдается повышение потока, что говорит о наличии пылевых оболочек вокруг этих звезд. Предполагая, что излучение звезды и пылевых оболочек можно описать моделью абсолютно черного тела, были вычислены температуры и светимости как самих звезд, так и окружающих их пылевых оболочек.

На диаграмме температура–светимость были показаны области возможных параметров (L, T) для каждой звезды, что позволило оценить массы объектов, привлекая модельные расчеты эволюции массивных звезд. Кроме то-

го, на основе известных светимостей и температур, были вычислены радиусы звезд. Результаты третьей главы опубликованы в работах [1] и [5].

В четвертой главе представлены результаты исследования двух новых WR-звезд редкого подкласса WNL в нашей Галактике, обнаруженных в результате поиска оболочек вокруг звезд на изображениях *Spitzer* в полосе $24 \mu m$. На 6-м телескопе SAO РАН и 3.5-м телескопе *Calar Alto* (Испания) были получены спектры этих объектов. На спектрах выявлены многочисленные детали, свойственные WR-звездам. Были измерены интенсивности и полуширины основных линий в спектрах обеих звезд. По отношению интенсивностей линий в спектрах была проведена спектральная классификация звезд – объект J201708.12+410727.0 был классифицирован как WN8-9h, а объект J184927.34-010420.8 – как WN7h. В результате им были присвоены названия WR 138a и WR 121b.

Были измерены потоки от объектов в инфракрасном диапазоне (полосы $3.6, 4.5, 5.8, 8.0, 24.0$ и $70.0 \mu m$), на основе которых с привлечением данных из каталога 2MASS-обзора и оптических измерений были построены спектральные распределения энергии в диапазоне от $3000-700000 \text{ \AA}$. Было выполнено детальное моделирование обоих спектров и определены фундаментальные параметры звезд. Результаты четвертой главы опубликованы в работах [2] и [4].

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

В приложении приведены каталоги кандидатов в массивные звезды на финальных стадиях эволюции в галактике M 33 с результатами кроссидентификации.

Список цитированной литературы

- [1] R. M. Humphreys and K. Davidson, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **106**, 1025 (1994).
- [2] E. Hubble and A. Sandage, *Astrophys. J.* **118**, 353 (1953).
- [3] P. Massey, R. T. McNeill, K. A. G. Olsen, P. W. Hodge, C. Blaha, G. H. Jacoby, R. C. Smith, and S. B. Strong, *Astronom. J.* **134**, 2474 (2007).
- [4] A. M. van Genderen, *Astronom. and Astrophys.* **366**, 508 (2001).
- [5] D. Calzetti, A. L. Kinney, H. Ford, J. Doggett, and K. S. Long, *Astronom. J.* **110**, 2739 (1995).
- [6] S. Fabrika and O. Sholukhova, *Astrophys. and Space Sci.* **226**, 229 (1995).
- [7] P. Massey, L. Bianchi, J. B. Hutchings, and T. P. Stecher, *Astrophys. J.* **469**, 629 (1996).
- [8] P. Massey, K. A. G. Olsen, P. W. Hodge, S. B. Strong, G. H. Jacoby, W. Schlingman, and R. C. Smith, *Astronom. J.* **131**, 2478 (2006).
- [9] V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, and S. Fabrika, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **405**, 1047 (2010).
- [10] V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, S. Fabrika, O. Sholukhova, L. N. Berdnikov, A. M. Cherepashchuk, and A. V. Zharova, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **405**, 520 (2010).
- [11] V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, W. Hamann, L. N. Berdnikov, S. Fabrika, and A. F. Valeev, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **403**, 760 (2010).

- [12] V. V. Gvaramadze, S. Fabrika, W. Hamann, O. Sholukhova, A. F. Valeev, V. P. Goranskij, A. M. Cherepashchuk, D. J. Bomans, and L. M. Oskinova, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **400**, 524 (2009).

Бесплатно

А. Ф. Валеев

Поиск и исследование массивных звезд на финальных стадиях эволюции в
галактиках Треугольник и Млечный Путь

Зак. №1с Уч.изд.лит. 2.0 Тираж 100

Российская Академия Наук Специальная астрофизическая обсерватория