



“ УТВЕРЖДАЮ ”

Директор по научной деятельности
Казанского (Приволжского)
федерального университета

проф. Таюрский Д.А.
“19” ноября 2021 г.

Отзыв Ведущей организации
на диссертацию **Соловьевой Юлии Николаевны**
ЯРЧАЙШИЕ ЗВЕЗДЫ ЗА ПРЕДЕЛАМИ МЕСТНОЙ ГРУППЫ ГАЛАКТИК,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.02 - Астрофизика и звездная астрономия

Роль массивных звезд ($M > 25 M_{\odot}$) в химической и динамической эволюции вещества галактик чрезвычайно велика, несмотря на то, что их эволюция очень коротка по времени по сравнению с эволюцией самих галактик, в которых массивные звезды рождаются. На протяжении своей яркой и насыщенной событиями астрофизической жизни массивные звезды быстро эволюционируют, последовательно проходя через стадии гигантов и сверхгигантов до вспышек сверхновых, обогащая межзвездную среду тяжелыми элементами, и воздействуя на процессы звездообразования в своих окрестностях. Одной из интересных стадий эволюции массивных звезд является стадия их пребывания в состоянии ярких голубых переменных звезд (luminous blue variables, LBV), которая характеризуется высокими значениями температуры оболочки и отношением светимости к массе, а также значительной фотометрической и спектральной переменностью. Интерес к изучению массивных звезд в стадии LBV важен в связи с тем, что эта стадия является связующей между эволюцией звезды на Главной последовательности и заключительными периодами жизни на стадиях звезд типа Вольфа-Райе и последующих вспышек в виде сверхновых. На сегодняшний день известно лишь около 40 звезд на стадии LBV в нашей Галактике и галактиках Местной группы на расстояниях до 1 Мпк. За пределами Местной группы известно лишь несколько LBV и LBV-кандидатов. В данной диссертационной работе предпринята попытка поиска и классификации новых LBV звезд и LBV-кандидатов за пределами Местной группы. В этом состоит **актуальность и значительная новизна** исследования.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения – всего 134 страницы, включая 42 рисунка и 10 таблиц, список цитированной литературы содержит 158 работ.

Во **введении** сделан обзор опубликованных данных по ярким голубым переменным, включающий информацию об истории обнаружения и исследований звезд данного типа, о методах поиска LBV-звезд в нашей и близких галактиках, описание типов фотометрической переменности и особенностей в спектральном распределении энергии, обсуждение эволюционного статуса ярких голубых переменных, а также описание других наблюдаемых типов массивных звезд и их возможной эволюционной связи с LBV. Также во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, указаны цели, задачи и научная новизна, перечислены положения, выносимые на защиту, отмечены научная и практическая значимость исследования.

В **первой** Главе дается информация о наблюдательных данных и их обработке. Отмечается, что предварительный отбор объектов для исследования был выполнен сотрудниками Лаборатории Физики Звезд САО РАН на основе архивных изображений галактик за пределами Местной группы, полученных на космическом телескопе им.

Хаббла с использованием широкополосных и узкополосных фильтров, пропускающих излучение в линии H_α на соответствующих красных смещениях. В результате отбора были выделены 177 источников с избытком излучения в линии H_α в галактиках Северной части небесной сферы и порядка 300 объектов в галактиках южной полусферы. Для 141 и 91 объектов в каждой из полусфер, соответственно, была выполнена спектроскопия на телескопах БТА/SCORPIO и SALT/RSS в ЮАР. Спектроскопические наблюдения на телескопе БТА выполнялись с непосредственным участием диссертанта. Последующий анализ спектральных данных позволил выделить 50 объектов, которые показывали спектральные особенности, присущие звездам типа LBV. В диссертации представлены результаты детального исследования девяти LBV-кандидатов в трех галактиках NGC4736, NGC247, NGC4449. В **первой** главе подробно изложены основные этапы обработки спектров, в частности, алгоритмы экстракции спектров в тесных звездных полях, в также обработки фотометрических данных космических и наземных телескопов.

Вторая Глава содержит описание результатов фотометрии и спектроскопии исследуемых кандидатов в галактиках NGC4736, NGC247, NGC4449. Отмечается, что спектры всех кандидатов в LBV показывают наличие множества эмиссионных линий, характерных для звезд типа LBV, в частности, линии водорода с широкими компонентами, эмиссионные линии разрешенных и запрещенных линий ионов железа FeII и [FeII]. Некоторые линии водорода, гелия и иона железа имеют профили типа P Cyg. По спектральным данным БТА/SCORPIO обнаружена переменность некоторых объектов в период с 2015 по 2018 годы, которая сопровождалась падением блеска на одну величину в фильтре V. В отдельном разделе **второй Главы** описан метод оценки межзвездного поглощения по соотношению интенсивностей водородных линий бальмеровской серии в спектрах туманностей, окружающих исследуемые кандидаты в LBV. Приведены оценки межзвездного поглощения с применением данной методики. Во **второй** Главе также представлены результаты выявленной фотометрической переменности у большинства из исследуемых кандидатов в LBV с амплитудами от 0.3 до 2-х звездных величин на шкалах времени в 5 - 20 лет.

Третья Глава посвящена спектральной классификации и определению фундаментальных параметров изучаемых звезд. Отмечается, что для оценки температур фотосфер применялись разные методы в зависимости от полученного набора наблюдательных данных. В частности, для трех источников J125057.26+410723.13, J125055.84+410625.44, J125103.35+410635.37 температура оценена по наблюдаемым интенсивностям спектральных линий как 18000, 15000, 12000 К, соответственно, с неопределенностями порядка 2000-3000 К. Для объектов из галактики NGC4736 температура оценивалась также путем определения показателя цвета (B-V)₀, освобожденного от эффекта межзвездного покраснения. В результате получены значения температур 17000 и 9300 К для двух звезд - J125057.26+410723.13 и J125103.35+410635.37, соответственно, которые подтверждают значения температур, определенных по спектральным линиям. Боллометрические светимости исследуемых звезд лежат в пределах $\log(L_{bol}/L_{\odot}) = (5.3 - 6.5) \pm 0.2$ mag и подтверждают статус этих звезд как звезд верхней части диаграммы Герцшпрунга-Рессела. Для кандидатов, для которых имелись фотометрические данные в широком диапазоне длин волн, оценка температур фотосфер (15000-18000 К) была выполнена на основе широкополосных спектральных распределений энергий (SED), аппроксимированных в чернотельном приближении. Для объектов, у которых в распределении энергии присутствуют избытки излучения в ближнем ИК диапазоне, были выполнены оценки температур газопылевых околосредных оболочек, которые составили 1300 -1400 К.

На основе полученных диссертантом значений температуры и светимости в **третьей** Главе обсуждается положение исследуемых звезд на диаграмме "Температура-Светимость" и приводится оценка начальных масс объектов, полученная из сравнения

наблюдаемых положений с теоретическими эволюционными треками для массивных звезд. В отдельном разделе **третьей** Главы предложена спектральная классификация объектов, выполненная на основе наблюдаемых характеристик и полученных оценок светимости: три источника отнесены к LBV, два классифицированы как B[e] сверхгигант и кандидат в B[e] сверхгиганты, 4 объекта остаются в качестве кандидатов в LBV, и для их более точной классификации требуются дополнительные наблюдения, анализ и исследования.

В **четвертой** Главе представлены результаты оценки возраста звездных окружений кандидатов в галактиках NGC247 и NGC4449. Показано, что диаграммы "Цвет - звездная величина", построенные для областей вблизи исследуемых звезд в обеих галактиках, демонстрируют признаки непрерывного звездообразования в них. Положение большего числа в галактике NGC247 описывается изохронами с возрастом 10-30 млн. лет, а непрерывное звездообразование (либо несколько эпизодов звездообразования) в галактике NGC4449 наблюдается в течение последних 100 млн. лет. При этом положение самых молодых звезд, включая несколько исследуемых в диссертации источников хорошо согласуются с изохронами с возрастом 5-10 млн. лет. Для части исследуемых источников небольшой возраст порядка 10 млн. лет может объясняться результатом эволюции тесных двойных звезд с обменом масс, в результате чего эти объекты оказались в диапазоне "молодых возрастов".

В **заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы.

В целом можно охарактеризовать представленную диссертацию как комплексное, актуальное, тщательно и добросовестно выполненное обширное исследование, обладающее большой **новизной**. Необходимо отметить большой задел в части фотометрических и спектральных наблюдательных данных по теме исследования, предварительно полученный в Лаборатории Физики Звезд САО РАН, и послуживший основой для успешного выполнения и развития работы диссертантом. Соловьевой Ю.Н. выполнена как комплексная обработка большого объема наблюдательных данных, так и самостоятельно проведены спектроскопические наблюдения по тематике исследования на 6-м телескопе БТА с использованием приборов SCORPIO. Ею освоены методика специфической обработки фотометрических и спектральных данных в тесных звездных полях и методики определения фундаментальных параметров звезд и оценки межзвездного поглощения в окрестностях исследуемых источников. Несмотря на значительное число спектральных данных, использованных для поиска звезд на стадии LBV среди 50 первоначальных кандидатов, в окончательном списке с классификацией оказалось лишь 9 источников с наиболее уверенными определениями фундаментальных параметров, что подчеркивает тщательность проведенного исследования и **достоверность** полученных результатов. **Научную значимость** имеют обнаружение в галактиках за пределами Местной группы трех новых звезд на стадии LBV и четырех кандидатов в LBV, что существенно дополняет ранее ограниченный набор известных LBV на расстояниях более 1 Мпк. **Большую практическую значимость** имеет обширный архив обработанных спектральных данных для слабых далеких звезд высокой светимости в галактиках за пределами Местной группы.

Представленная к защите диссертация не лишена и некоторых недостатков.

1. Оценка температуры фотосферы большинства исследуемых кандидатов в LBV в Главе 3 выполнена в приближении чернотельного излучения. Насколько обосновано применение такого приближения для описания спектрального распределения энергии для объектов, имеющих сложную структуру во внешних атмосферных слоях?
2. Почему современный численный код CMFGEN был использован для описания спектра лишь одного источника?

3. В Главе 1 приводятся расстояния до галактик NGC4736, NGC247, NGC4449, которые далее используются для получения болометрических светимостей исследуемых источников. Значения расстояний основаны на опубликованных модулях расстояний в компилятивной выборке из статьи Tully et al. 2013, под номером [108] в списке литературы. В диссертации никоим образом не оценивается влияние возможных погрешностей в определении расстояний до галактик на точность болометрических светимостей звезд. В значении модуля расстояния $(m - M) = 38.15 \text{ mag}$ для галактики NGC4449 на стр. 34, видимо, содержится явная опечатка - для указанного расстояния в 4.27 Мпк значение модуля расстояния должно быть $(m - M) = 28.15 \text{ mag}$.

Указанные недостатки имеют технический характер, не умаляют научных достоинств диссертации и не влияют на результаты, выносимые на защиту.

Апробация работы обеспечена выступлениями диссертанта на российских и международных научных конференциях. Основные положения диссертации опубликованы в 3 статьях в ведущем рецензируемом журнале мирового уровня MNRAS, входящего в Перечень ВАК, и 4-х статьях по материалам представительных конференций.

В целом, диссертация Соловьевой Ю.Н. представляет собой оригинальное научное исследование с **новизной** в обнаружении массивных звезд на стадии LBV и кандидатов в LBV в трех галактиках за пределами Местной группы и определением их основных физических параметров.

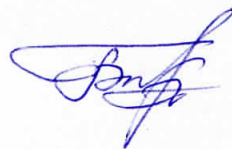
Результаты, полученные в диссертации Соловьевой Ю.Н., могут быть использованы в ГАИШ МГУ, САО РАН, ИНАСАН, КФУ, КрАО, ГАО РАН и в других отечественных и зарубежных организациях, занимающихся исследованиями массивных звезд в нашей и ближайших галактиках.

Автореферат полностью соответствует структуре и содержанию диссертации.

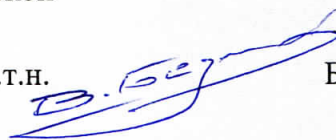
Считаем, что диссертация "**Ярчайшие звезды за пределами Местной группы галактик**" является завершенным научным исследованием и удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор **Соловьева Юлия Николаевна заслуживает** присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия.

Отзыв подготовлен доктором физ.-мат. наук, профессором кафедры астрономии и космической геодезии Института физики КФУ Бикмаевым Ильфаном Фяритовичем, обсужден и утвержден на Астрофизическом Семинаре кафедры астрономии и космической геодезии Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета 13-го ноября 2021 года.

Бикмаев Ильфан Фяритович., Институт физики КФУ
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008
телефон (843)-292-77-97
электронный адрес: ilfan.bikmaev@kpfu.ru



Заведующий кафедрой астрономии и космической геодезии Института Физики Казанского (Приволжского) федерального университета, к.т.н.
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008
телефон (843)-292-77-97



Безменов В.М.