

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

(01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия)

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель —
доктор физ.-мат. наук,
профессор Фабрика С. Н.

Нижний Архыз–2021

Содержание

Введение	4
1 Отбор кандидатов, наблюдательные данные и их обработка	30
1.1 Свойства галактик NGC 4736, NGC 247 и NGC 4449	32
1.2 Наблюдения и описания приборов	35
1.2.1 Спектральные наблюдения	35
1.2.2 Фотометрические наблюдения	39
1.3 Обработка спектральных данных	43
1.4 Обработка фотометрических данных	46
1.4.1 Данные космических телескопов.	46
1.4.2 Данные наземных телескопов.	48
1.4.3 Особенности фотометрии отдельных объектов	50
2 Фотометрия и спектроскопия кандидатов в галактиках NGC 4736, NGC 247, NGC 4449	55
2.1 J125057.26+410723.13	55
2.2 J125055.84+410625.44	58
2.3 J125103.35+410635.37	60
2.4 J004703.27-204708.4	62
2.5 J004702.18-204739.93	65
2.6 J122810.94+440540.6	66
2.7 J122811.70+440550.9	68
2.8 J122817.83+440630.8	71
2.9 J122809.72+440514.8	71
3 Определение фундаментальных параметров кандидатов в га- лактиках NGC 4736, NGC 247, NGC 4449. Спектральная клас- сификация	77
3.1 Определение фундаментальных параметров	77
3.1.1 J125057.26+410723.13	77
3.1.2 J125055.84+410625.44	78

3.1.3	J125103.35+410635.37	78
3.1.4	J004703.27-204708.4	79
3.1.5	J004702.18-204739.93	81
3.1.6	J122810.94+440540.6	81
3.1.7	J122811.70+440550.9	84
3.1.8	J122817.83+440630.8	85
3.1.9	J122809.72+440514.8	86
3.2	Диаграмма Герцшпрунга-Рессела для обнаруженных LBV- кандидатов	93
3.3	Спектральная классификация кандидатов	97
4	Оценка возраста звёздного окружения кандидатов в галакти- ках NGC 247 и NGC 4449	105
4.1	Звёздное окружение LBV кандидатов в галактике NGC 247	106
4.2	Звёздное окружение LBV кандидатов в галактике NGC 4449 . . .	108
4.3	Выводы	114
	Заключение	115
	Список литературы	118

Введение

Поиск и изучение массивных звёзд представляет собой одну из самых актуальных задач современной астрофизики. Их эволюция коротка в сравнении с временем жизни галактик, однако, массивные звёзды значительно влияют на их химическую эволюцию, обогащая межзвёздную среду тяжёлыми элементами, которые образуются на финальных стадиях эволюции этих звёзд.

Массивные звёзды являются ярчайшими звёздами, наблюдаемыми в других галактиках. К ним относятся различные типы сверхгигантов. В классификации, предложенной Р. Хэмфрис и соавторами [1], звезды высокой светимости разделяются на несколько типов по спектральным и фотометрическим особенностям: Of/late-WN-звезды, яркие голубые переменные (luminous blue variables, LBVs), тёплые (жёлтые) гипергиганты, Fe II-эмиссионные звезды, горячие и промежуточные сверхгиганты, B[e]-сверхгиганты. На фоне перечисленных классов LBV звезды выделяются своим высоким значением отношения светимости к массе. Данное диссертационное исследование преимущественно посвящено поиску и изучению LBV звёзд.

Исторический взгляд на LBV

Звёзды LBV - это ярчайшие ($> 10^5 L_{\odot}$) массивные ($M \geq 25 M_{\odot}$, [2]) проэволюционировавшие звёзды, для которых характерна значительная спектральная и фотометрическая переменность в разных временных масштабах. Подтверждение статуса LBV у кандидатов представляет собой сложную задачу, поскольку это требует большого количества наблюдательного времени для выявления фотометрической и спектральной переменности.

Известно два исторических примера LBV звёзд. Около 180 лет назад наблюдалась "великая вспышка" звезды η Car с 1837 по 1858 годы. Во время значительного увеличения блеска η Car была одной из самых ярких звёзд на небе. Более ранние наблюдения показывают, что блеск звезды колебался между 4^m и 2^m видимой звёздной величиной в течение веков во время возможных вспышек типа S Dor (см. ниже) [3]. Джон Гершель и другие исследователи зарегистрировали поведение η Car во время гигантской вспышки: в течение 20 лет блеск

колебался между видимыми величинами 0^m и 1.5^m , кратковременно достигая значения -1^m . Затем блеск быстро (примерно за 10 лет) уменьшился и звезда стала невидимой невооруженным глазом, после чего её видимая звёздная величина достигла значения $7-8^m$. Подробное описание кривой блеска приведено в работе [4].

Вторая и меньшая по амплитуде вспышка η Car началась в 1887 году и продолжалась семь лет. Первый фотографический спектр, полученный в 1892-1893 гг. во время этой вспышки, содержал сильные эмиссионные линии водорода и напоминал спектр сверхгиганта класса F. По своей продолжительности и амплитуде эта вспышка была похожа на переменность типа S Dor (см. ниже). В настоящее время известно, что η Car представляет собой двойную систему из массивных звёзд массами 60 и 30 M_{\odot} [5], окружённую туманностью "Гомункул" биполярной формы, образовавшейся в результате гигантской вспышки и связанным с ней выбросом большого количества звёздного вещества.

В 17 веке звезда P Cyg показывала подобные изменения блеска. В 1600 году она внезапно вспыхнула и её видимая звёздная величина достигла значения 3^m , после чего последовало понижение яркости. В 1655 году произошло повышение яркости практически до первоначального уровня и затем блеск звезды оставался относительно постоянным ($\sim 5^m$). Затем, начиная с 1700 года, звезда испытывала медленное постепенное увеличение яркости [6, 7]. В настоящее время P Cyg не показывает значительного изменения блеска.

Изучение переменных этого типа началось в 20 веке. В работе Джона Чарльза Дункана [8] опубликованы три переменные звезды Var 1, Var 2, Var 3 в галактике M 33, которые были первыми переменными звёздами, обнаруженными во внешней галактике, после чего к этим переменным добавились Var A, Var B, Var C, обнаруженные Эдвином Хабблом [9]. Затем Э. Хаббл опубликовал список переменных голубых иррегулярных переменных звёзд, обнаруженных в галактике M 31 [10], часть из которых была подробно исследована в работе [11]. В последующих работах такие звезды стали называть "переменными Хаббла-Сэндиджа".

В 1970-х годах к списку переменных этого типа добавлены ещё несколько

звёзд, среди которых Var 83 из M 33, AE And и AF And из M 31 и другие. В работе [12] изложено исследование восьми переменных звёзд в галактиках M 31 и M 33, которые были обозначены автором как «яркие голубые переменные», а также установлена связь с переменными типа S Dor.

Позднее было выяснено, что целый ряд горячих переменных звёзд Млечного Пути и Магеллановых облаков оказались схожи с переменными Хаббла-Сэндиджа и, вероятно, находились на близких стадиях эволюции, поэтому для удобства их описания П. Конти объединил их в один тип LBV [13].

Проблема поиска LBV звёзд

Яркие голубые переменные – весьма малочисленный класс массивных звёзд. Поиск LBV звёзд производится, в основном, в галактиках Местной группы и практически все известные на данный момент LBV и LBV-кандидаты находятся в пределах 1 Мпк [14]: к 2018 году обнаружены только 41 LBV и 108 LBV-кандидатов в нашей и ближайших галактиках.

Первые LBV звёзды были обнаружены по фотометрической переменности в оптическом диапазоне с использованием фотографических методов, и для того, чтобы зарегистрировать изменения блеска звезды, могли требоваться десятки лет. Позже появилось множество других методов.

Поиск LBV звёзд в Галактике осложняется низкой точностью определения расстояния и сильным поглощением излучения пылью в плоскости Галактики. Известно, что многие LBV окружены компактными околозвёздными газопылевыми оболочками различной морфологии [15, 16], возникшими во время вспышек, и поэтому они невидимыми в оптическом диапазоне. За счёт теплового излучения пыли в околозвёздных оболочках наиболее эффективным способом их обнаружения является использование данных инфракрасных телескопов (например, космический телескоп Spitzer, Wide-field Infrared Survey Explorer и т.д.). За последнее десятилетие с помощью этого метода было обнаружено несколько новых LBV и sLBV в Галактике [17–20]. Однако, расстояния до Галактических LBV часто не определяются точно даже по новейшим данным космического телескопа Gaia, что приводит к ненадежным оценкам параметров звёзд, в том

числе их светимости.

В то же время наиболее точные измерения расстояний и небольшие межзвездные поглощения делают ближайшие галактики идеальными лабораториями для поиска и изучения LBV звёзд. Одним из наиболее часто используемых методов поиска является обнаружение $H\alpha$ -эмиссий, связанных с яркими голубыми звездами [21–25]. Звёзды, исследуемые в данной работе, обнаружены именно этим методом.

Объекты этого типа возможно искать как горячие (голубые) звёзды по данным фотометрии в далёком ультрафиолетовом и оптическом диапазонах [26–28] с последующей оптической спектроскопией выделенных кандидатов. Кроме того, яркие звёзды с высоким темпом потери массы (в том числе LBV звёзды) могут быть найдены по узкополосным изображениям с вычтенным континуумом в фильтрах, максимум пропускания которых соответствует линиям $H\alpha$ и [S II], как звездообразные объекты с очень низким отношением потоков в фильтрах [S II] и $H\alpha$ [29]. Этот метод позволяет исключить области H II и остатки сверхновых за счёт использования изображений в фильтре [S II].

Наблюдательные проявления LBV

Фотометрическая переменность

Как отмечалось выше, LBV звёзды показывают переменность блеска различной амплитуды на разных масштабах времени:

1) Переменность типа η Car (эруптивные LBV, или импосторы сверхновых, см. ниже). Такой тип переменности нерегулярен и имеет форму гигантских вспышек. Самые экстремальные вспышки или гигантские извержения с амплитудой более 2.5^m наблюдаются на временах от нескольких лет до сотен–тысяч лет. Звёзды, проявляющие такой тип переменности, называются переменными типа η Car [30]. Во время гигантских вспышек болометрическая светимость звезды не остается постоянной, и может происходить увеличение темпа потери массы на порядки величины, что может привести к образованию эмиссионной туманности (как в случае прототипа η Car).

2) Более частые вспышки с амплитудами 0.1 – 2.5^m (переменность типа S Dor)

наблюдаются на временных шкалах от нескольких лет до десятилетий [31]. Принято считать, что во время цикла переменности типа S Dor болометрическая светимость остается приблизительно постоянной и визуальное поярчение звезды происходит из-за изменения её цвета, связанного с понижением температуры и увеличением радиуса фотосферы звезды. Однако, в ряде работ показано, что некоторые LBV, не являясь эруптивными, показывают изменения болометрической светимости. Например, полная светимость одного из прототипов LBV звёзд AG Car уменьшилась в 1.5 раза во время максимума блеска в полосе V по сравнению с значением светимости во время визуального минимума [32]. Предполагается, что уменьшение болометрической светимости этой звезды связано с затратами энергии на расширение внешних слоев звезды. Другими примерами LBV звёзд с изменяющейся болометрической светимостью являются AFGL2298 [33] из нашей Галактики и S Dor [34] из Большого Магелланова Облака.

В работе [35] были выделены две фазы переменности типа S Dor: короткая (S)-SD фаза с характерными временами < 10 лет и длинная (L)-SD на временах порядка ≥ 20 лет. Обе фазы могут налагаться друг на друга и наблюдаться одновременно. Предполагается, что они вызваны двумя различными областями неустойчивостей.

3) Переменность типа α Cygni с амплитудами порядка 0.2^m , характерная для всех проэволюционировавших массивных звёзд (переменных типа α Cygni). Данный тип переменности возникает в результате нерадиальных пульсаций звезды. Вероятной причиной пульсаций является κ -механизм¹. В работе [36] переменные типа S Dor рассматриваются как подкласс переменных типа α Cyg, причем это предположение подтверждается фотометрическим поведением известной LBV звезды P Cyg. В этой же работе предполагается, что в одной и той же области температур переменные типа S Dor и нормальные переменные типа α Cyg показывают практически одинаковый тип микровариаций блеска.

¹см. раздел "Возможные механизмы переменности типа S Dor" во Введении

Спектральные особенности и распределение энергии в спектре

Во время визуального максимума оптически толстая протяжённая атмосфера LBV звезды или "псевдофотосфера" [37] имеет спектр сверхгиганта классов А-F [38]. Поскольку температура фотосферы имеет значение около 7000 К, в спектре LBV наблюдаются слабые эмиссионные линии гелия He I и железа Fe II, линии водорода с профилями P Cyg и широкими крыльями, которые указывают на значительное истечение вещества в виде ветра, а также другие спектральные линии, которые могут излучаться при данной температуре.

По мере падения визуального блеска и повышения температуры фотосферы в спектре ярких голубых переменных начинают сильнее проявляться эмиссионные линии бальмеровской серии водорода, нейтрального He I и ионизованного He II гелия, нейтрального азота N I и углерода C I, а также линии ионизованных металлов: железа Fe II, кремния Si II и прочих. Наблюдаемые спектральные линии также нередко имеют профили типа P Cyg, которые могут исчезнуть в максимуме визуального блеска (как в случае звезды P Cyg, [39]). Кроме того, наблюдаются запрещенные линии железа [Fe II], азота [N II], образующиеся в отдалённых областях звёздного ветра. При достижении звездой минимума визуального блеска температура фотосферы может достигать значений более 35000 К [40], и спектр звезды становится подобным спектру звёзд WNLh (поздние Вольфа-Райе звезды азотной последовательности с линиями водорода).

Спектральное распределение энергии LBV-звёзд показывает ближний ИК-избыток в диапазоне длин волн 1-2 микрона, связанный со свободно-свободным излучением газа звёздного ветра. Избыток ИК излучения, связанного с горячей или тёплой околозвёздной пылью, обычно не наблюдается [41, 42]. Спектральные распределения некоторых LBV показывает избыток излучения на длинах волн больше 8 микрон, который, вероятно, связан с излучением холодных пылевых околозвёздных оболочек [38].

Эволюционный статус и положение на диаграмме Герцшпрунга-Рессела

В классическом представлении LBV звёзды соответствуют очень короткой фазе перехода от одиночных массивных звёзд O-типа к звездам типа Вольфа-Райе (WR) [43]. Физически это означает переход от горения водорода в ядре к горению гелия, при этом звёздный ветер и вспышки на стадии LBV играют определяющую роль в удалении водородной оболочки для образования звёзд типа Вольфа-Райе [43–46]. Описанный переход от одиночных звёзд O-типа к WR (азотной WN или углеродной WC последовательности в зависимости от начальной массы) через их потерю массы называется «сценарием Конти» [47]. Для O-звёзд различных начальных масс эволюция может выглядеть следующим образом [48]:

$$M \sim 25 - 40 M_{\odot}: O \rightarrow \text{LBV/RSG} \rightarrow \text{WN(H-poor)} \rightarrow \text{SN Ib};$$

$$M \sim 40 - 75 M_{\odot}: O \rightarrow \text{LBV} \rightarrow \text{WN(H-poor)} \rightarrow \text{WC} \rightarrow \text{SN Ic};$$

$$M > 75 M_{\odot}: O \rightarrow \text{WN(H-rich)} \rightarrow \text{LBV} \rightarrow \text{WN(H-poor)} \rightarrow \text{WC} \rightarrow \text{SN Ic};$$

В некоторых исследованиях [49, 50] предложены идеи о том, что LBV звёзды могут быть непосредственными предшественниками сверхновых с коллапсом ядра. Имеется ряд подтверждений этих идей. Например, в работе [51] исследовался спектр сверхновой SN 2005gj, в котором были обнаружены многокомпонентные абсорбционные профили типа P Cyg линий водорода и гелия, что, как предполагается, отражает историю потери массы предшественником. Поскольку подобные профили линий наблюдаются только в спектрах LBV, авторы заключили, что предшественником данной сверхновой была LBV звезда. В работе [52] показано, что вращающиеся массивные звёзды с начальными массами 20–25 M_{\odot} могут эволюционировать по следующей схеме: звезда приходит на Главную последовательность нулевого возраста как O-звезда позднего типа (от O6V до O7.5V), затем эволюционирует в голубого сверхгиганта

(класса В или О), после чего проходит стадии красного сверхгиганта RSG и голубого сверхгиганта BSG (либо голубого гипергиганта BHG, для модели звезды $20M_{\odot}$) или О-сверхгиганта (OSG)/WNL (для модели $25M_{\odot}$) и, наконец, проявляет себя как LBV перед коллапсом ядра и вспышки как сверхновой:

$$20M_{\odot}: O7.5V \rightarrow BSG \rightarrow RSG \rightarrow BSG/BHG \rightarrow LBV \rightarrow SN;$$

$$25M_{\odot}: O6V \rightarrow OSG \rightarrow RSG \rightarrow OSG/WNL \rightarrow LBV \rightarrow SN.$$

Таким образом, можно ожидать, что вращающиеся массивные звёзды с начальными массами 20-25 M_{\odot} и спектром, характерным для LBV звёзд, могут непосредственно предшествовать коллапсу ядра и последующему событию взрыва сверхновой.

По положению на диаграмме Гершпрунга-Рессела LBV (переменные типа S Dor) разделяются на два класса [2, 38]. Наиболее яркие классические LBV с болометрическими звёздными величинами от -9.7^m до -11.5^m (рисунок 1) эволюционировали, вероятно, из очень массивных звёзд с массами более $50 M_{\odot}$. Высокий темп потери массы не позволяет им эволюционировать до стадии красного сверхгиганта [53]. Менее яркие LBV с болометрическими звёздными величинами от -8.0^m до -9.5^m могут проходить стадию красного сверхгиганта в ходе своей эволюции.

Кроме того, в полосе нестабильности S Dor на диаграмме Гершпрунга-Рессела находятся и сверхгиганты с нормальным темпом потери массы, однако они эволюционируют в сторону низких температур. Звёзды LBV отличаются от гораздо более многочисленных нормальных сверхгигантов с аналогичными значениями эффективной температуры и светимости своей близостью к пределу Эддингтона и высоким значением отношения L/M [54]. Для LBV значение фактора Эддингтона составляет $\Gamma = L/L_{Edd} \simeq 0.5$ [55], в результате эти звёзды пересекают предел Хэмфрис-Дэвидсона [53]. Столь высокие светимости можно объяснить тем, что LBV с меньшими светимостями прошли стадию красного сверхгиганта и переместились назад влево на диаграмме Гершпрунга-Рессела

([56]. Звёзды с начальными массами $22 - 45 M_{\odot}$, возвращаясь в область более высоких температур, будут проходить через стадию LBV, потеряв около половины своей начальной массы [57], из этого следует, что эволюционное состояние менее ярких LBV принципиально отличается от классических LBV.

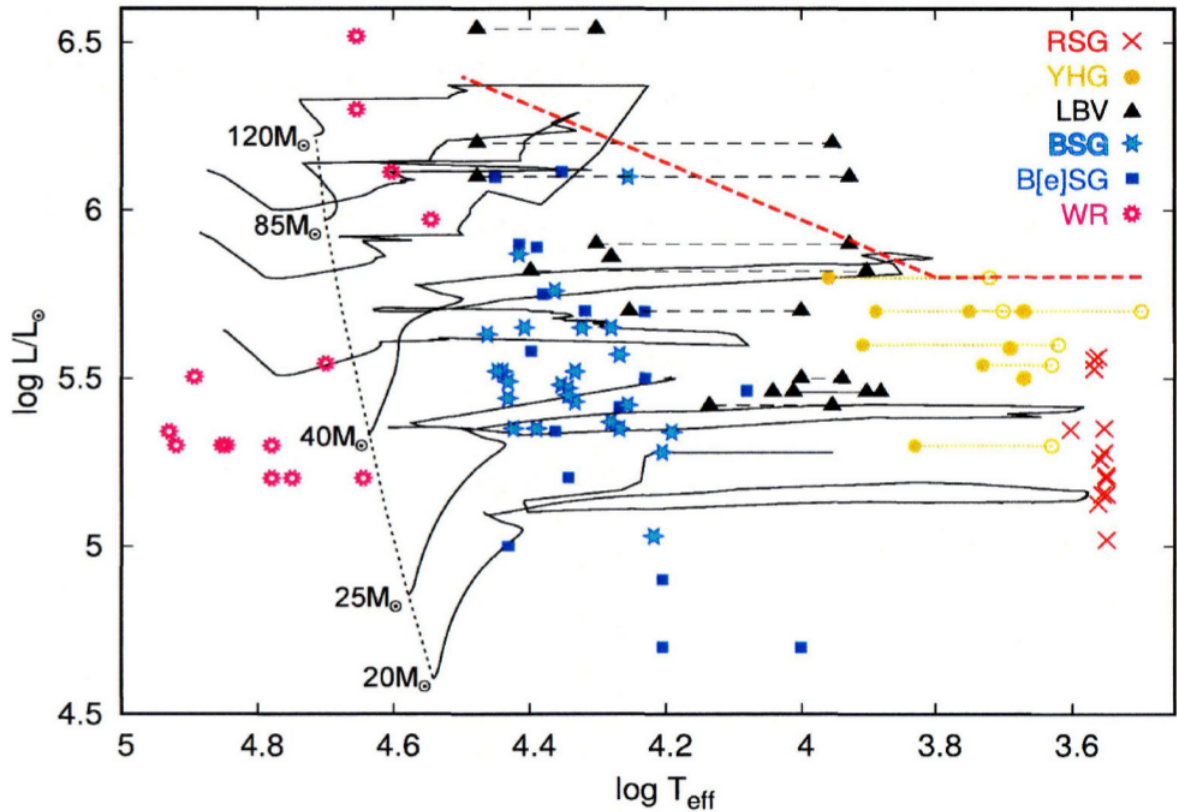


Рисунок 1 — Основные фазы сильно проэволюционировавших звёзд: LBV звёзды, жёлтые гипергиганты, красные сверхгиганты, B[e]-сверхгиганты, голубые сверхгиганты, WR звёзды. Красной пунктирной линией обозначен предел Хэмфрис-Дэвидсона (диаграмма взята из работы [58], рисунок 1).

Возможные механизмы переменности типа S Dor

Исторически первым из рассматриваемых механизмов неустойчивости звёзд был ϵ - механизм, который приводит в действие пульсации Леду или Леду-Шварцшильда (пульсации, возбуждаемые в областях образования ядерной энергии в звезде) [59–61]. Однако этот механизм применим, в основном, к молодым массивным звёздам главной последовательности и в настоящее время не применяется в контексте объяснения явления LBV звёзд.

В работе Хэмфрис и Дэвидсон [38] в качестве наиболее вероятной причины LBV-феномена рассматривается близость звезды к модифицированному преде-

лу Эддингтона [62], основное отличие которого от классического предела Эддингтона состоит в зависимости коэффициента непрозрачности от температуры и плотности. В работах [63, 64] показана возможность релаксационных колебаний между двумя состояниями с разными температурами фотосферы. Непрозрачность имеет тенденцию увеличиваться при температурах ниже 30000 К, достигает пика около 12000 К, а затем уменьшается при достижении фотосферой более низких температур. Следовательно, атмосфера может иметь два разных квазистабильных состояния: при температурах выше 15000 К и ниже 10000 К, подобно тому, что наблюдается при переменности типа S Dor.

Де Ягер [65] показал, что одновременно с давлением излучения сверхзвуковая турбулентность может дестабилизировать атмосферу, и этот механизм становится более эффективным при высоких светимостях, что приводит к возрастанию темпа потери массы.

Наряду с нестабильностью, обусловленной давлением излучения, субфотосферные динамические механизмы, предложенные в работах [66, 67] являются наиболее вероятным объяснением переменности типа S Dor. В этих моделях "странные моды" и динамические неустойчивости вызваны скачком или увеличением непрозрачности из-за железа в основании фотосферы, что приводит к сильной нестабильности, связанной с ионизацией во внешней оболочке, когда звезды перемещаются по диаграмме Герцшпрунга-Рессела после окончания горения водорода в ядре. Эти модели обеспечивают правильные временные рамки переменности типа S Dor и достаточно хорошо воспроизводят полосу нестабильности S Dor и верхнюю границу светимости на диаграмме Герцшпрунга-Рессела.

Москалик и Дзембовски [68] в качестве механизма, объясняющего существование ярких голубых переменных, предложили κ -механизм, который отвечает за пульсации цефеид и некоторых других переменных звёзд. Этот механизм может быть ответственен за некоторые микровариации блеска (до 0.1^m), наблюдаемые у LBV и других сверхгигантов [69], которые происходят в промежутках времени от недель до месяцев. Однако временная шкала переменности блеска типа S Dor намного длиннее, и поэтому, вероятно, этот тип переменности не связан с пульсациями.

Помимо перечисленных механизмов, существуют и альтернативные модели. Например, в работе [70] показана потенциальная значимость влияния быстрого вращения на величину переменности LBV звёзд.

Импосторы сверхновых

В 1965 году Фрицем Цвикки был предложен новый класс сверхновых типа «V» с относительно слабой максимальной светимостью, но большой продолжительностью. В качестве примеров были приведены только SN 1961V и η Car. На данный момент эти объекты известны как «импосторы сверхновых» (supernova impostors). Этим названием охарактеризовано явление гигантских вспышек LBV звёзд, при которых звезда не разрушается в результате коллапса ядра и может наблюдаться в дальнейшем [71]. Большое число объектов, первоначально классифицированных как сверхновые (SNe), являются импосторами. Гигантские вспышки характерны для звёзд массой 50-60 M_{\odot} и сопровождаются большой потерей массы, что критически меняет эволюцию этих звёзд [72]. Спектры многих наблюдаемых импосторов напоминают спектры сверхновых типа II_n наличием узких эмиссионных линий водорода, на основании чего импосторы получают обозначение SN. Однако впоследствии выясняется, что их светимость не столь велика, как у сверхновых типа II_n, и изменение спектров и кривых блеска со временем отлично от истинных сверхновых. В максимуме блеска импосторы сверхновых обычно достигают абсолютной звёздной величины от -13^m до -16^m [73], в то время как истинные сверхновые ярче -16^m [74].

Известно четыре исторических примера импосторов сверхновых: η Car, P Cyg, SN1954J и SN1961V [75–77]. На сегодняшний день известно около 40 импосторов сверхновых [78], которые отличаются своими наблюдательными характеристиками и разделяются на два типа объектов: транзиенты с яркими узкими эмиссионными линиями и кривой блеска, характеризующейся с вторичной вспышкой меньшей амплитуды, следующей за первичной вспышкой, и транзиенты, за которыми менее, чем через 10 лет следует взрыв истинной сверхновой с коллапсом ядра [79].

Другие типы звёзд высокой светимости

Как отмечалось выше, в работе [1] предложено разделение звёзд высокой светимости на несколько типов по спектральным и фотометрическим особенностям: Of/late-WN-звезды, LBV, теплые гипергиганты, Fe II-эмиссионные звезды, горячие и промежуточные сверхгиганты, B[e]-сверхгиганты. Ниже приводится краткая характеристика каждого из типов.

В некоторые периоды своей жизни LBV имеют похожие с B[e]-сверхгигантами спектры. B[e]-сверхгиганты (sgB[e]) - это яркие ($4 < \log(L_{bol}/L_{\odot}) < 6$, [80]) звёзды, ушедшие с главной последовательности, которые не обладают значительной переменностью (на уровне $0.1-0.2^m$) [81]. Спектры sgB[e] содержат сильные эмиссионные линии водорода и множество узких линий некоторых элементов, образуемых при разрешённых и запрещённых переходах [82], например, запрещённые линии [Fe II]. Так же звёзды этого типа показывают очень широкие, смещённые в голубую сторону резонансные линии сильно ионизованных элементов в ультрафиолетовом диапазоне. Эти резонансные линии излучаются горячим и быстрым звездным ветром, который характерен для сверхгигантов той же температуры и светимости. Одновременное присутствие горячего и быстрого полярного ветра, проявляющегося в ультрафиолетовом диапазоне, и холодного и медленного экваториального ветра, наблюдаемого на оптических длинах волн, привело к появлению так называемой гибридной или двухкомпонентной модели ветра, которая хорошо объясняет спектры sgB[e] [83].

Спектральное распределение энергии (SED) sgB[e] показывает значительный ближний инфракрасный избыток на длинах волн 3-8 микрон, возникающий из горячей околозвездной пыли [84–86]. Предполагается, что пыль, вероятнее всего, образуется в медленном и холодном компоненте ветра и заполняет кольцевую или дискообразную область на далёких расстояниях от яркого центрального объекта [83].

В спектроскопическом обзоре эмиссионных звёзд [87] обозначили эмиссионные линии кислорода [O I] λ 6300, 6364 как одну из характеристик B[e]-звёзд. Дублет кальция λ 7291, 7324 как индикатор околозвёздного газа характерен

для спектров В[e]-звёзд с большой массой (то есть для sgV[e]). Кроме В[e]-сверхгигантов, запрещенные линии [Ca II] наблюдаются также у теплых гигантов [88].

Теплые гипергиганты представляют собой класс объектов, значимых для понимания заключительных стадий эволюции массивных звёзд до коллапса их ядра и взрыва сверхновой. Их отличительной особенностью является абсорбционный спектр А-Ф звёзд с эмиссионными линиями водорода. Спектральное распределение энергии тёплых гипергигантов имеет ближний и средний ИК избыток на длинах волн 1-8 микрон, вызванный, по-видимому, свободно-свободным излучением звёздного ветра и тепловым излучением околозвёздной пыли [88]. Фотометрическая переменность тёплых гипергигантов не превышает $0.1-0.2^m$. Такая величина переменности характерна для сверхгигантов классов А-Ф (переменность типа α Cygni, [89]).

Некоторые авторы (например, [90]) ранее предполагали, что часть тёплых гипергигантов представляют собой LBV звёзды в максимуме визуального блеска, когда их оптически толстые ветры напоминают сверхгиганты класса А-Ф. На диаграмме Герцшпрунга-Рессела эти тёплые гипергиганты лежат в области температур 7000-9000 К, и действительно перекрываются с областью расположения LBV в максимуме блеска [38], однако, в отличие от LBV, ветры этих теплых гипергигантов не являются оптически толстыми [88].

Звёзды Of/late-WN имеют хорошо известные спектральные характеристики звёзд типа Of и поздних WN с эмиссионными линиями N III и He II λ 4686 в дополнение к сильным линиям излучения водорода и He I [91]. Считается, что эти звезды эволюционно связаны с LBV: известны переходы LBV \rightarrow Ofpe/WN9 звёзд AG Car или R 127 [92, 93].

Отличительными особенностями звёзд с эмиссиями Fe II (iron stars, "железные звёзды [94]) является голубой континуум с сильными эмиссионными линиями водорода в спектре и многочисленными яркими линиями железа Fe II, а также отсутствие линий поглощения. Спектры звёзд этого типа показывают слабые линии He I (или не демонстрируют их вообще) и не содержат линий-индикаторов околозвёздной пыли - [Ca II] и [O I]. Некоторые из звёзд этого типа

Ф. Массей отнёс к типу горячих LBV-кандидатов из-за их сходства со спектрами LBV в горячем состоянии (минимуме визуального блеска) [90]. Спектральное распределение энергии имеет ИК-избыток, связанный со свободно-свободным излучением звёздного ветра и тепловым излучением пыли [1].

Тип горячих сверхгигантов включает в себя яркие 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.). В статье Ф. Массея некоторые звёзды этого типа были названы холодными LBV-кандидатами [90]. Им свойственна спектральная и некоторая фотометрическая переменность [1].

Промежуточные (или жёлтые) сверхгиганты включают визуально наиболее яркие звезды в соответствующих галактиках. Многие из самых ярких сверхгигантов A- и F-типа часто демонстрируют абсорбционный спектр с эмиссионными линиями водорода, что связано с потерей массы и ветром, что характерно для звёзд этой группы. В работе [1] показано, что в отличие от теплых гипергигантов почти все без исключения жёлтые сверхгиганты не показывают ИК-избыток, связанный с излучением пыли, а также запрещённых линий-индикаторов околзвёздной пыли - [Ca II] и [O I]. Фотометрическая переменность жёлтых сверхгигантов имеет тип α Cygni, свойственный практически всем сверхгигантам классов A-F.

Эволюционная связь между объектами перечисленных типов неясна. В некоторых работах (например, [87, 95]) рассматривается сценарий, согласно которому тёплые гипергиганты, вероятно, являются объектами, прошедшими стадию красного сверхгиганта, и могут эволюционировать в sgB[e], а затем в менее яркие LBV, как только сбросят тёплую пылевую оболочку.

Среди этих типов массивных звёзд лишь LBV-звёзды показывают существенную спектральную переменность, и их наиболее важной и определяющей характеристикой является фотометрическая переменность типа S Dor.

Актуальность исследования

Как отмечалось ранее, на сегодняшний день известно лишь 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, [42, 96–98]). 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, связи с другими звёздами высокой светимости (например, В[е]-сверхгигантами и тёплыми гипергигантами). Расширение списка известных LBV-звёзд, что на данном этапе исследований предполагает их поиск главным образом за пределами Местной группы, а также детальное изучение их наблюдательных свойств, может позволить решить перечисленные задачи, что и обуславливает актуальность данной работы.

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 Хаббла (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 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 M33 и AF And из M31) 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, В[e]-сверхгиганта и кандидата в В[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 околозвёздные 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 объектов. Для звёзд 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 В[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

стью важен 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 околозвёздной оболочке;
3. Результаты исследования возрастов звёздного окружения LBV звёзд, LBV-кандидатов, B[e]-сверхгиганта и кандидата в B[e]-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 B[e]-сверхгиганта в галактике NGC 247 оценены температуры окружающих газопылевых оболочек.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитированной литературы из 158 наименований, содержит 134 страниц текста, включая 42 рисунка 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 $H\alpha$ на соответствующих красных смещениях. В результате отбора были выделены 177 точечных источников с избытком излучения в линии $H\alpha$ в галактиках северной полусферы и около 300 объектов в южной полусфере. 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 некото-

рых 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 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 V[e]-сверхгигантов. По данным БТА/SCORPIO выявлена спектральная переменность некоторых объектов. В частности, спектр объекта 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 соотношение водородных линий бальмеровской серии окружающих объекты туманности, а также приведены результаты оценок меж-

звёздного поглощения с применением данного 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 В и V характерен для подтверждённых LBV звёзд [99]. 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 В 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 методы. 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 $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.11^{+0.20}_{-0.16}$ и $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.24^{+0.20}_{-0.25}$, 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 [100] для расчёта модели атмосферы

ры звезды, что дало оценки температуры фотосферы $T_{\text{eff}} = 9300 \text{ K}$ 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 B[e]-сверхгигант и кандидат в B[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 замет-

но выше остальных звёзд на диаграмме, для чего были предложены две интерпретации: 1) В виду малой населённости верхней части диаграмм вероятно 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.

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 наблюдениях на телескопе БТА САО РАН, и подготовке к наблюдениям на телескопе SALT. Автор является заявителем наблюдательных программ «Новые кандидаты в LBV в близких галактиках» на телескопе БТА и «Фотометрия LBV-кандидатов» на телескопе Цейсс-1000. Обработка спектроскопических и фотометрических наблюдательных данных, фотометрические измерения по новым и архивным данным наземных телескопов, а также по архивным данным космических телескопов HST и Spitzer, выполнены автором. Оценка фундаментальных параметров изучаемых звёзд выполнены совместно с соавторами. Во всех работах автор внёс равноценный вклад в обсуждение и интерпретацию результатов, а также определяющий вклад в подготовке статей к публикации.

1 Отбор кандидатов, наблюдательные данные и их обработка

Данная глава посвящена описанию используемых в работе спектральных и фотометрических данных, а также приборов и методов наблюдений. Также приведено описание методики отбора объектов исследования, обработки спектральных и фотометрических данных.

Отбор объектов для исследования по данным космического телескопа им. Хаббла
Объекты для исследования были выделены сотрудниками Лаборатории Физики Звёзд. Отбор производился с использованием архивных изображений, полученных на космическом телескопе им. Хаббла, разрешающая способность которого ($0.10''$ для камеры ACS/WFC) достаточна для разделения звёзд в тесных полях в галактиках Местного объёма.

Для отбора объектов использовались изображения иррегулярных и спиральных галактик южного и северного неба за пределами Местной группы. Изображения, полученные с помощью камер ACS/WFC, WFC3 и WFPC2 телескопа HST, были взяты из архива Hubble Legacy Archive². В качестве LBV-кандидатов отбирались источники, которые являются точечными на изображениях, полученных в широкополосных фильтрах. Для большинства объектов критериями отбора было ограничение абсолютной звёздной величины $M_V \leq -8^m$, а также наличие избытка излучения в узких фильтрах (F656N, F657N, F658N), пропускающих излучение в линии H α на соответствующих красных смещениях. В результате отбора были выделены 177 объектов в галактиках северного неба и около 300 объектов на южном небе.

Спектральные наблюдения кандидатов и их результаты
Спектры объектов северного неба были сняты на телескопе БТА с редуктором SCORPIO [101] в рамках наблюдательной программы "Массивные звезды в близких галактиках-(заявитель С.Н. Фабрика). Спектральные данные объектов южного неба были получены на телескопе SALT (ЮАР) [102, 103] со спектрографом

²<https://hla.stsci.edu/hlaview.html>

RSS [104, 105]. Описание приборов, использованных в наблюдениях, а также алгоритм обработки спектральных данных, приведены в секции 1.3.

Количество объектов северного неба, спектры которых получены на телескопе БТА, составляет 141. Для 68 объектов сняты только спектры в красном диапазоне (гризма VPHG1200R), для девяти объектов получены только спектры в голубом диапазоне (гризмы VPHG1200B, VPHG1200G). Для остальных объектов получены спектры в широком диапазоне длин волн (гризмы VPHG1200B/VPHG1200G+VPHG1200R).

На телескопе SALT были сняты спектры 91 объектов южного неба в широком диапазоне длин волн.

Результаты первичной спектроскопии. После обработки спектральных данных, основные этапы которой описаны ниже, и получения одномерных спектров объектов, были отобраны те из них, которые имеют эмиссионные спектральные линии, характерные для LBV звёзд и некоторых других звёзд высокой светимости: широкие линии бальмеровской серии водорода, линии гелия He I, He II, железа Fe II и [Fe II], углерода C II, азота N II, линии, имеющие профили типа P Cyg и т. д.

В результате отбора по спектрам объектов северного неба (144 объекта) произведена следующая первичная классификация. 25 объектов показывают какие-либо из вышеперечисленных спектральных особенностей, присущих звёздам типа LBV. В спектрах 12 объектов присутствуют в бленды линий C III+N III λ 4650 (Bowen blend) и He II, которые наблюдаются в звёздах WR и в скоплениях WR звёзд [106, 107]. Более 50% объектов имеют спектр без явных особенностей с голубым континуумом и линиями туманности (линии водорода, [O III], [O I], [S II] и т. д.), что характерно для молодых скоплений звёзд (неразрешённых OB ассоциаций), окружённых H II областью. Спектры около 30% объектов имеют низкое отношение «сигнал–шум», из-за чего их классификация затруднена.

По итогам отбора спектров объектов южного неба (91 объект) получены следующие результаты. Спектры 25 объектов имеют черты, характерные для звёзд типа LBV. В спектрах 13 объектов обнаружены бленды линий C III+N III λ 4650

и He II, характерные для звёзд WR и скоплений WR звёзд. Молодые звёздные скопления, окружённые H II областью, составили около 30% от общего числа объектов, для которых получены спектры. Приблизительно 30% спектров имеют низкое отношение «сигнал–шум», вследствие чего невозможно определить тип объекта.

Спектры некоторых из наиболее перспективных из отобранных кандидатов были повторно получены на телескопе БТА в рамках программы наблюдений «Новые кандидаты в LBV в близких галактиках» (заявитель Соловьева Ю.Н.), а также на телескопе SALT. Кроме того были получены изображения в широкополосных фильтрах на телескопах Цейсс-1000 (программа наблюдений «Фотометрия LBV-кандидатов», заявитель Соловьева Ю. Н.), БТА и 2.5-м телескопе КГО ГАИШ.

В данном диссертационном исследовании представлены результаты изучения девяти LBV-кандидатов в галактиках NGC 4736, NGC 247 и NGC 4449, которые были опубликованы в работах [1–7].

1.1 Свойства галактик NGC 4736, NGC 247 и NGC 4449

Одной из галактик, в которой проводился поиск LBV-кандидатов, была галактика NGC 4736, находящаяся на расстоянии около 4.59 Мпк (модуль расстояния $m - M = 28.31 \pm 0.08$, [108]). Это галактика морфологического типа SABa³, которая имеет удачную ориентацию - она расположена "плашмя" по отношению к лучу зрения, что позволяет эффективно проводить поиски ярчайших звёзд. Темп звездообразования, измеренный по $H\alpha$ -излучению, в этой галактике сравним со скоростью звездообразования в галактиках M 33 и M 31 (по данным базы Catalog and Atlas of the LV galaxies ⁴). По архивным данным HST в этой галактике было отобрано три LBV-кандидата: J125057.26+410723.13, J125055.84+410625.44, J125103.35+410635.37 (см. рисунки 2, 3, 4). В работе [109] они обозначены как NGC 4736_1, NGC 4736_2 и NGC 4736_3, соответственно.

Карликовая спиральная галактика (SAB(s)d) NGC 247 - одна из ближайших спиральных галактик южного неба, находящаяся на расстоянии 3.52 Мпк

³по данным базы <http://leda.univ-lyon1.fr/>

⁴<https://serv.sao.ru/lv/lvgdb/>

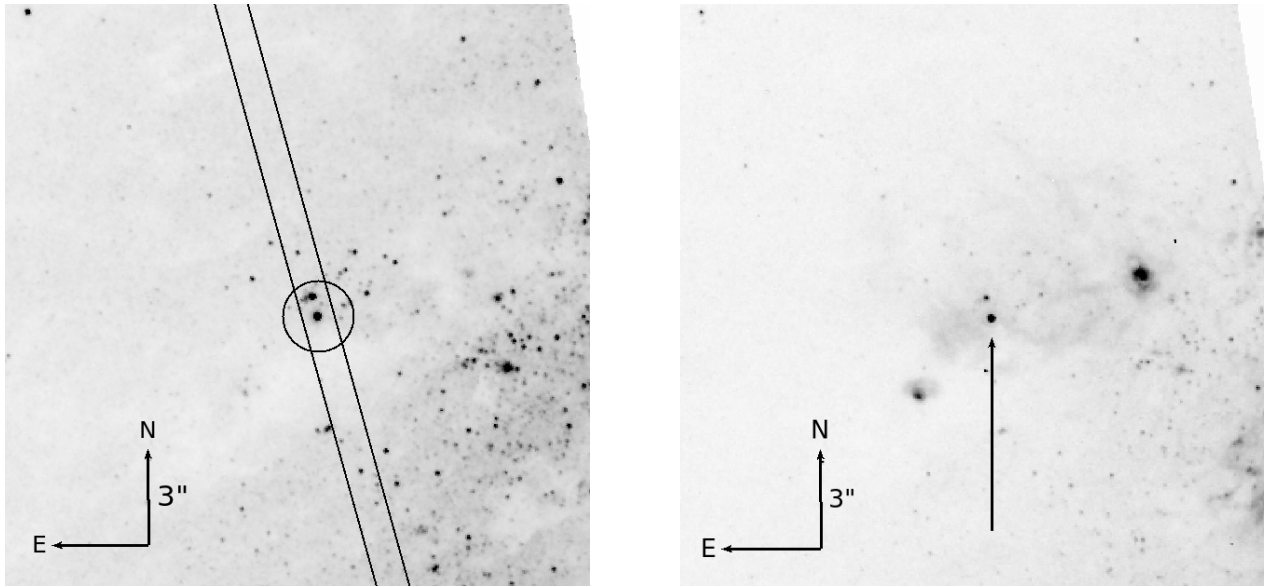


Рисунок 2 — Слева: Изображение области около J125057.26+410723.13 в фильтре ACS/WFC/F555W. Показана ориентация щели во время спектроскопических наблюдений на БТА/SCORPIO. Кружком обозначено положение объекта. Справа: Изображение области около J125057.26+410723.13 в фильтре ACS/WFC/F658N, положение объекта отмечено стрелкой.

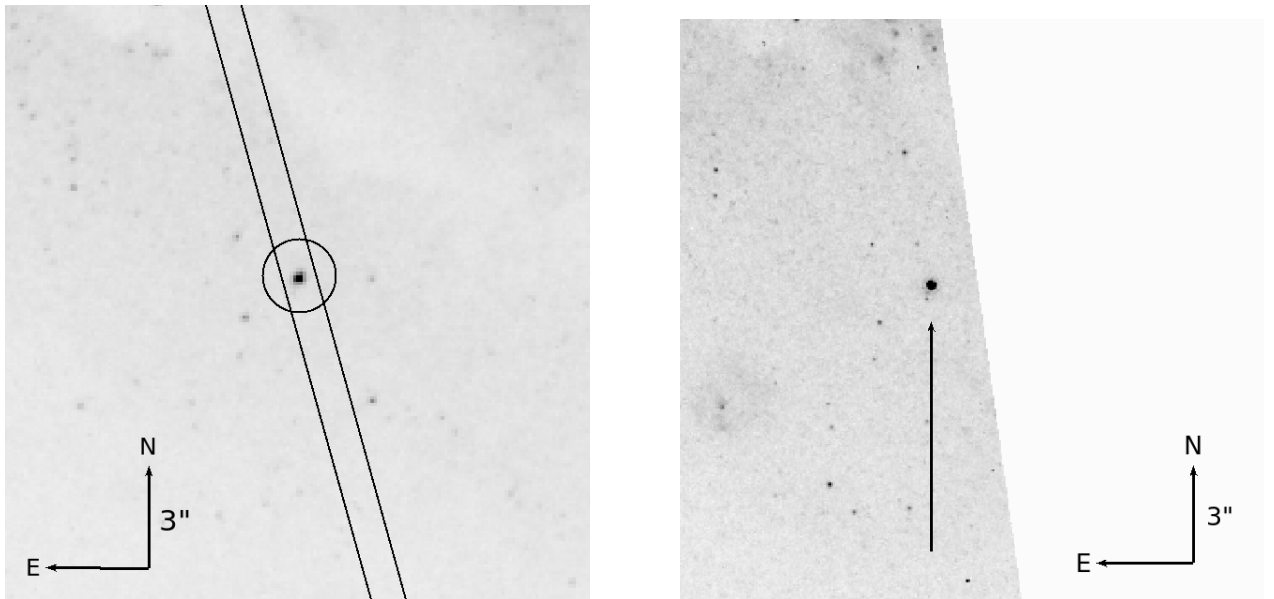


Рисунок 3 — Слева: Изображение области около J125055.84+410625.44 в фильтре WFPC2/F555W. Показана ориентация щели во время спектроскопических наблюдений на БТА/SCORPIO. Кружком обозначено положение объекта. Справа Изображение области около J125055.84+410625.44 в фильтре ACS/WFC/F658N, положение объекта отмечено стрелкой.

($m - M = 27.73 \pm 0.06^m$, [108]). Темп звездообразования и металличность этой галактики близки к значениям, наблюдаемым у галактики M33, но наклон NGC 247 к лучу зрения больше. По архивным данным HST в данной галактике были отобраны два голубых точечных ярких $H\alpha$ -источника J004703.27-204708.4

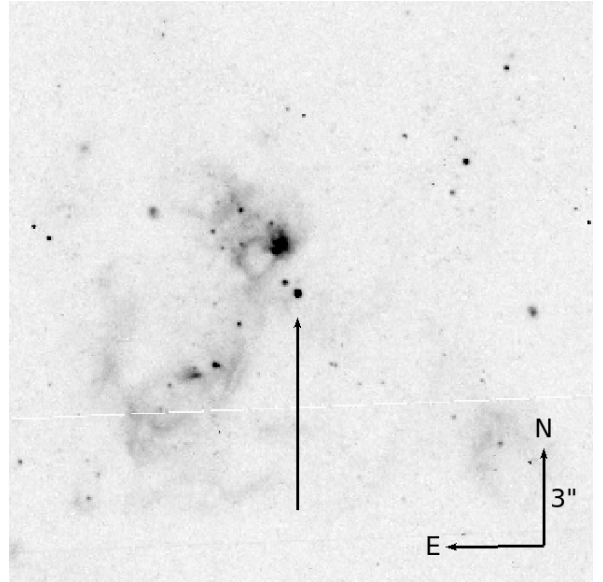
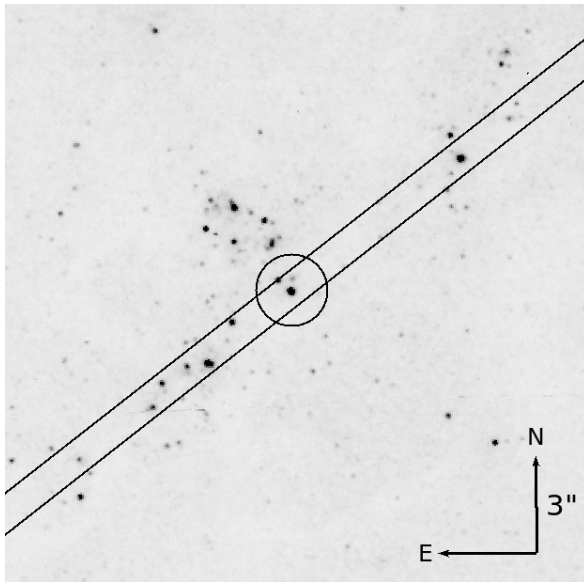


Рисунок 4 — Слева: Изображение области около J125103.35+410635.37 в фильтре ACS/WFC/F555W. Показана ориентация щели во время спектроскопических наблюдений на БТА/SCORPIO. Кружком обозначено положение объекта. Справа: Изображение области около J125103.35+410635.37 в фильтре ACS/WFC/F658N, положение объекта отмечено стрелкой.

5 и J004702.18-204739.93 6.

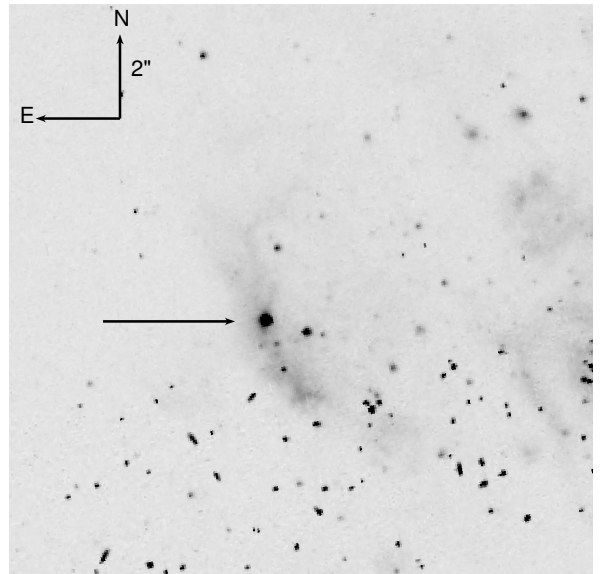
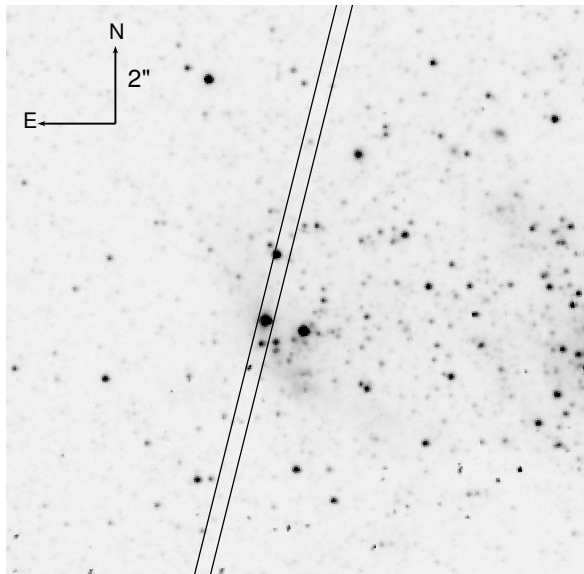


Рисунок 5 — Слева: Изображение области около J004703.27-204708.4 в фильтре ACS/WFC/F606W. Показана ориентация щели во время спектроскопических наблюдений на Subaru. Кружком обозначено положение объекта. Справа: Изображение области около J004703.27-204708.4 в фильтре ACS/WFC/F658N, положение объекта отмечено стрелкой.

Галактика NGC 4449 - это карликовая irregулярная галактика типа магеллановых облаков (тип Ibm), находящаяся на расстоянии 4.27 Мпк ($m - M = 38.15 \pm 0.10^m$ [108]). При этом общий темп звездообразования этой галактики превышает таковой у M31 и M33, и как общий, так и удель-

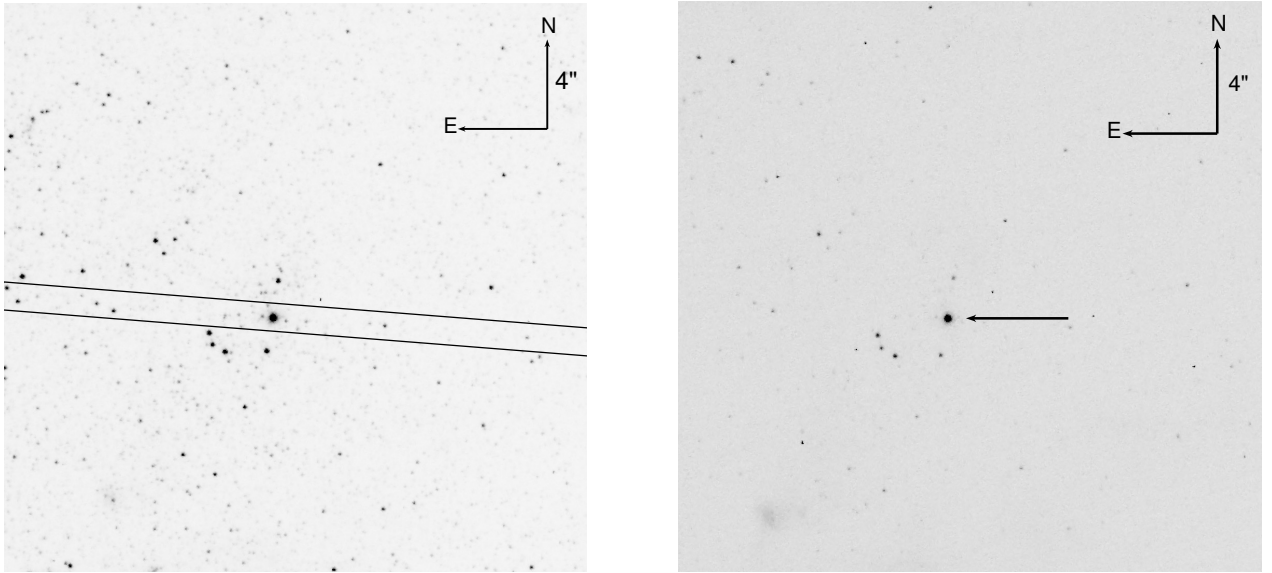


Рисунок 6 — Слева: Изображение области около J004702.18-204739.93 в фильтре ACS/WFC/F606W. Показана ориентация щели во время спектроскопических наблюдений на Subaru. Кружком обозначено положение объекта. Справа: Изображение области около J004702.18-204739.93 в фильтре ACS/WFC/F658N, положение объекта отмечено стрелкой.

ный темп звездообразования NGC 4449 выше, чем в Большом Магеллановом Облаке (по данным Catalog&Atlas of the LV galaxies⁵). В ходе поиска H α -источников по архивным снимкам HST в этой галактике было обнаружено 4 новых LBV-кандидата: J122810.94+440540.6 (F658N=17.48 \pm 0.05^m, рис.7), J122811.70+440550.9 (F658N=17.58 \pm 0.05^m, рис. 8), J122809.72+440514.8 (F658N=17.04 \pm 0.05^m, рис. 9) и J122817.83+440630.8 (F658N=18.33 \pm 0.05^m, рис. 10).

1.2 Наблюдения и описания приборов

1.2.1 Спектральные наблюдения

Спектры объектов из галактик NGC 4736 и NGC 4449 были получены на телескопе БТА с использованием многорежимного редуктора светосилы SCORPIO и универсального спектрографа SCORPIO-2 [101, 110], установленных в первичном фокусе телескопа. Наблюдения проводились в рамках программ «Массивные звезды в близких галактиках», заявитель Фабрика С. Н. и «Новые кандидаты в LBV в близких галактиках», заявитель Соловьева Ю. Н. SCORPIO снабжён ПЗС-матрицей EEV CCD42-40 размером 2048 \times 2048 элементов. Мас-

⁵<https://serv.sao.ru/lv/lvgdb/>

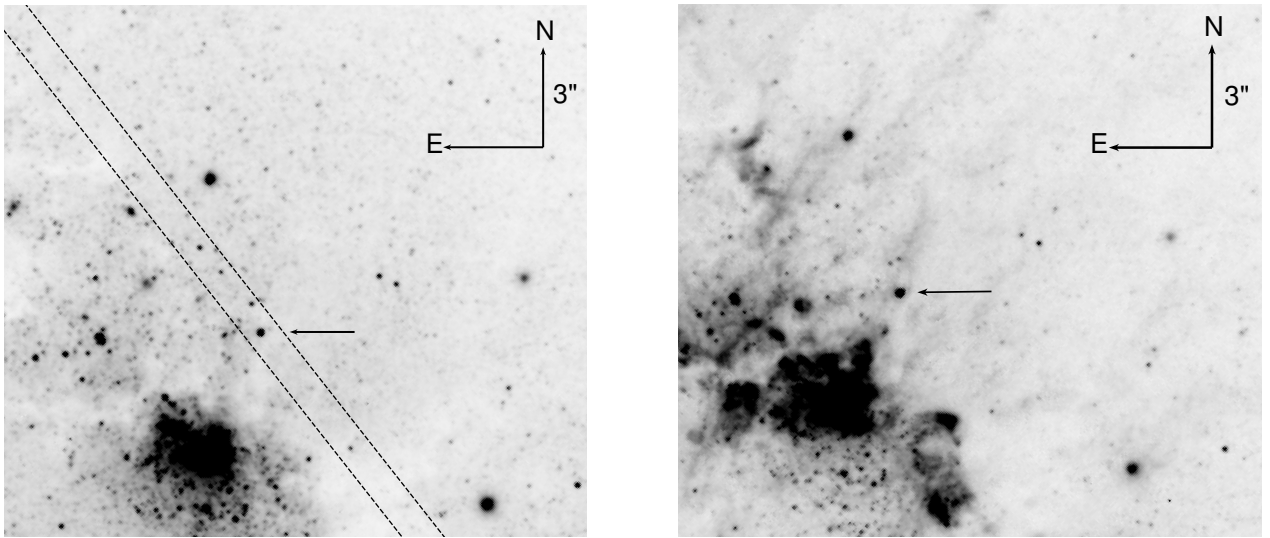


Рисунок 7 — Слева: Изображение области около J122810.94+440540.6 в фильтре ACS/WFC/F555W. Показана ориентация щели во время спектроскопических наблюдений на Subaru. Кружком обозначено положение объекта. Справа: Изображение области около J122810.94+440540.6 в фильтре ACS/WFC/F658N, положение объекта отмечено стрелкой.

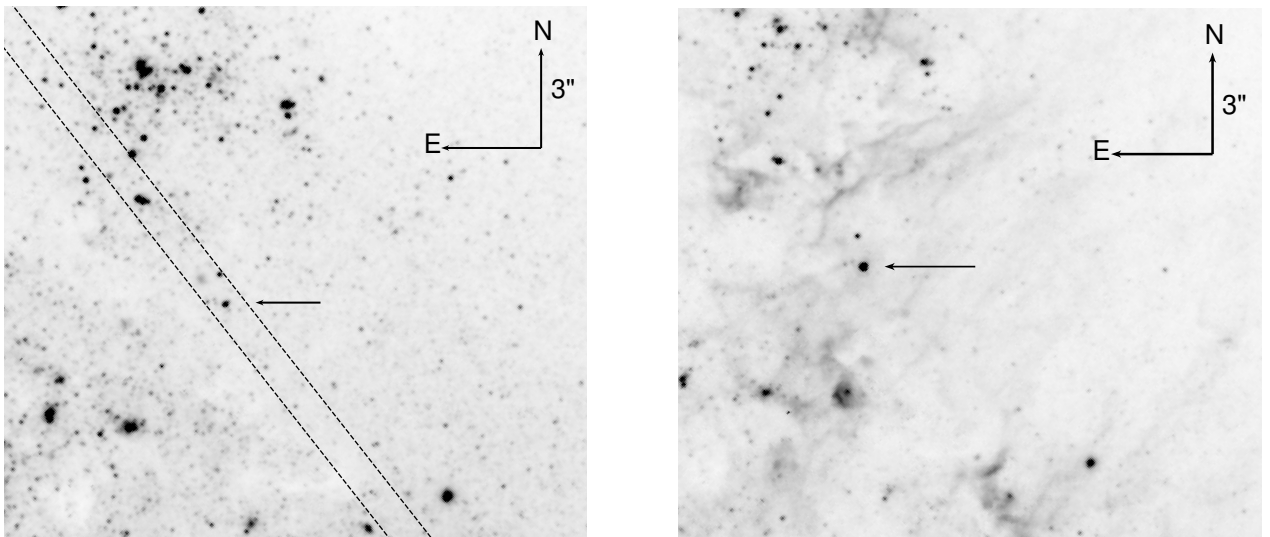


Рисунок 8 — Слева: Изображение области около J122811.70+440550.9 в фильтре ACS/WFC/F555W. Показана ориентация щели во время спектроскопических наблюдений на Subaru. Кружком обозначено положение объекта. Справа: Изображение области около J122811.70+440550.9 в фильтре ACS/WFC/F658N, положение объекта отмечено стрелкой.

штаб изображения составляет $0.36''/\text{pix}$ при бинировании 2×2 , а поле зрения матрицы - $6' \times 6'$. Наблюдения проводились в длиннощелевой моде с шириной щели $1''$. Для наблюдений применялись гризмы VPHG1200B (3600–5400 Å), VPHG1200G (3900–5700 Å), VPHG1200R (5700–7400 Å).

Прибор SCORPIO-2 оснащён матрицей E2V 42-90red размером 4612×2048 пикселей. Поле зрения SCORPIO-2 составляет приблизительно $6' \times 6'$, а масштаб пикселя - $0.39''/\text{pix}$ при бинировании 2×2 , стандартно используемом при

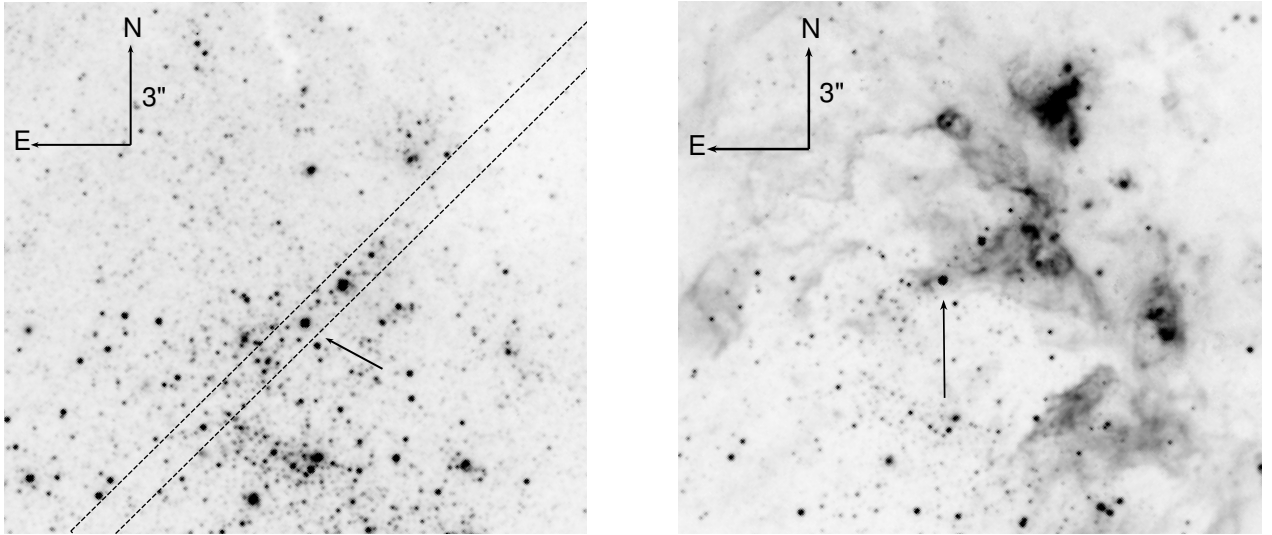


Рисунок 9 — Слева: Изображение области около J122809.72+440514.8 в фильтре ACS/WFC/F555W. Показана ориентация щели во время спектроскопических наблюдений на Subaru. Кружком обозначено положение объекта. Справа: Изображение области около J122809.72+440514.8 в фильтре ACS/WFC/F658N, положение объекта отмечено стрелкой.

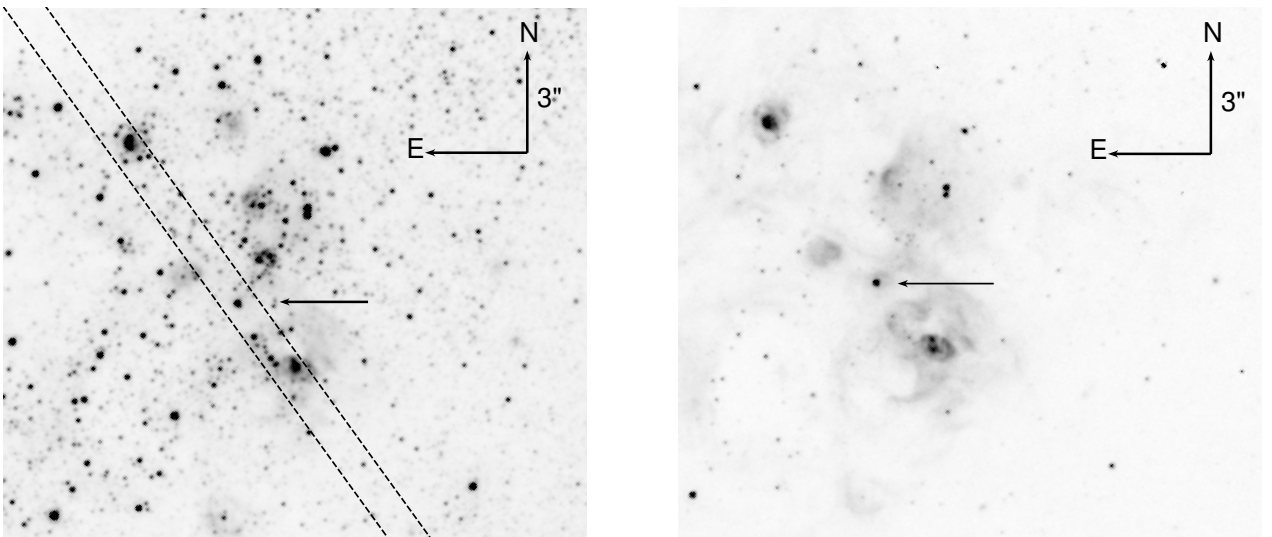


Рисунок 10 — Слева: Изображение области около J122817.83+440630.8 в фильтре ACS/WFC/F555W. Показана ориентация щели во время спектроскопических наблюдений на Subaru. Кружком обозначено положение объекта. Справа: Изображение области около J122817.83+440630.8 в фильтре ACS/WFC/F658N, положение объекта отмечено стрелкой.

съёмке фотометрических изображений. При наблюдениях использовалась гриз-ма VPHG1200@540, обеспечивающая спектральный диапазон 3650–7250 Å.

Оптические спектры кандидатов в галактике NGC 4736 были получены в 2014-2020 гг. с использованием SCORPIO с разрешением 5.3 Å. В таблице 1 приведен журнал наблюдений, где представлены даты наблюдений объектов, название используемой гризмы, время и количество экспозиций и размер изображений звёзд.

Таблица 1 — Журнал спектроскопических наблюдений кандидатов из NGC 4736 на БТА/SCORPIO.

Объект	Дата	Гризма	Спектр. разреш., Å	Размер зв. изобр.,''
J125057.26+410723.13	2014/01/03	VPHG1200R	5.0	1.0
	2015/01/18	VPHG1200G	5.0	1.2
	2018/02/18	VPHG1200G	5.0	1.0
	2020/01/18	VPHG1200B	5.5	1.1
J125055.84+410625.44	2014/01/03	VPHG1200R	5.0	1.0
	2015/01/18	VPHG1200G	5.0	1.2
	2018/02/18	VPHG1200G	5.0	1.0
J125103.35+410635.37	2014/01/03	VPHG1200R	5.0	1.0
	2017/03/31	VPHG1200G	5.0	1.3

Спектры объектов галактики NGC 4449 были получены в 2014-2020 годах с помощью SCORPIO и SCORPIO-2. Ширина щели составляла 0.5-1.2''. В таблице 2 перечислены даты наблюдений, размер звездных изображений и использованная гризма.

Таблица 2 — Журнал спектроскопических наблюдений БТА САО РАН объектов из галактики NGC 4449.

Объект	Дата	Гризма	Спектр. разреш., Å	Размер зв. изобр.,''
J122810.94+440540.6	2014/01/02	VPHG1200R*	5.0	1.6
	2015/01/18	VPHG1200G*	5.0	1.7
	2020/01/18	VPHG1200B*	5.5	1.8
J122811.70+440550.9	2014/01/02	VPHG1200R*	5.0	1.6
	2015/01/18	VPHG1200G*	5.0	1.7
	2020/01/18	VPHG1200B*	5.5	1.8
J122809.72+440514.8	2014/01/02	VPHG1200R*	5.0	1.5
	2015/01/18	VPHG1200G*	5.0	1.7
	2017/03/31	VPHG1200G*	5.0	1.8
	2018/02/18	VPHG1200G*	5.0	1.1
	2018/02/18	VPHG550G*	7.3	1.2
	2020/08/18	VPHG1200B*	5.5	1.6
J122817.83+440630.8	2021/02/11	VPHG1200@540**	5.2	2.3

* спектрограф SCORPIO, матрица EEV-42-40;

** спектрограф SCORPIO-2, матрица E2V42-90red.

Спектр J004703.27-204708.4 из галактики NGC 247 был получен как побочный продукт во время наблюдений ультраяркого рентгеновского источника в галактике NGC 247 в рамках наблюдательной программы С. Н. Фабрики и Ё. Уеды 09/10/2016 на телескопе Subaru (Гавайи). Наблюдения проводились в режиме длинной щели (ширина щели - 0.4'') с применением спектрогра-

фа FOCAS (Faint Object Camera and Spectrograph) [111], снабжённым двумя $2K \times 4K$ ПЗС-матрицами. Поле зрения прибора составляет $6' \times 6'$. Спектры получены с помощью призмы 300 В в диапазоне $3650-8300 \text{ \AA}$ с разрешением $\sim 5 \text{ \AA}$, однако, из-за присутствия рассеянного света на коротких длинах волн и вклада более высоких спектральных порядков на более длинных волнах для исследования объекта использовался диапазон $3800-7400 \text{ \AA}$ для исследования объекта. При наблюдениях применялось аппаратное бинирование 1×2 пикселя, что соответствует масштабу изображения $0.208''/\text{pix}$. Во время наблюдений размер звёздного изображения составлял $0.4-0.6''$, что позволило отделить объект J004703.27-204708.4 от ближайшей яркой звезды ($V = 19.78 \pm 0.03 \text{ mag}$, $H\alpha = 19.37 \pm 0.04 \text{ mag}$), расположенной на расстоянии около $1''$ (рисунок 5).

Кроме того, спектральные данные объектов J004703.27-204708.4 и J004702.18-204739.93 из галактики NGC 247 были получены на телескопе SALT (ЮАР) [102, 103] 11/11/2017 и 13/09/2018, соответственно. В наблюдениях использовался спектрограф RSS [104, 105] (наблюдатель А. Ю. Князев, Южноафриканская астрономическая обсерватория). Прибор оснащён ПЗС-детектором E2V 44-82 с размером $2K \times 4K$ пикселей. Масштаб изображения составляет $0.13''/\text{pix}$. Наблюдения проводились в длиннощелевой моде (ширина щели составляла $1.25''$) с использованием решетки PG0900 в спектральном диапазоне $4300-7400 \text{ \AA}$ с разрешением 5.3 \AA . Для исключения вклада более высоких спектральных порядков использовался УФ-фильтр PC03850. Размер изображений звёзд составлял $1.6-1.7''$, поэтому не удалось разрешить J004703.27-204708.4 и ближайшую яркую звезду.

1.2.2 Фотометрические наблюдения

Фотометрические данные кандидатов в галактике NGC 4736 получены с помощью 1-метрового телескопа Цейсс-1000 (программа «Фотометрия LBV-кандидатов», заявитель Соловьева Ю.Н.) и 6-метрового телескопа БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН, а также на 2.5-метровом телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ в сотрудничестве с К. Е. Атапиным. Кроме того, для фотометрических измерений использовались так-

же архивные данные наземных телескопов (KPNO 2.1-m, JKT, Palomar 60-inch). Даты наблюдений, приборы, фильтры и величины приведены в таблице 4.

Изображения области, содержащей оба кандидата из галактики NGC 247, были получены с помощью телескопа Subaru одновременно со спектроскопическими данными. Кроме того, прямые изображения были также получены с помощью 2.5-м телескопа Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ и Цейсс-1000 САО РАН. Для фотометрических измерений также использовались архивные данные некоторых наземных телескопов: датского 1.54-метрового телескопа, 0.9-метрового телескопа Межамериканской обсерватории Cerro Tololo (СТЮ), и телескопа Якобуса Каптейна (JKT). Кроме того, для фотометрии использовались и архивные данные с Very Large Telescope (VLT) и 2.2-м телескопа MPG ESO, из доступных данных которого были выбраны только изображения с размерами звездного изображения $\approx 0.8''$ или лучше, что позволило разрешить J004703.27-204708.4 и ближайшую яркую звезду. В таблице 6 приведены данные, которые использовались для фотометрических измерений.

Для объектов из галактики NGC 247 проведена так же фотометрия в ближнем ИК диапазоне по архивным данным камеры Infrared Array Camera (IAC) космического телескопа Spitzer ⁶. Телескоп Spitzer был запущен в 2003 году и выведен из эксплуатации в начале 2020 года. Инфракрасная камера IAC представляла собой инструмент, работающий одновременно на четырех длинах волн (3.6 мкм, 4.5 мкм, 5.8 мкм и 8 мкм). В каждом из модулей, соответствующих перечисленным фильтрам, использовался детектор размером 256×256 пикселей.

Фотометрические данные объектов в галактике NGC 4449 были получены на 2.5-метровом телескопе Кавказской Горной Обсерватории ГАИШ МГУ, на телескопах БТА и Цейсс-1000 САО РАН. В работе также были использованы архивные данные телескопа Bok Национальной обсерватории Китт-Пик. В таблице 8 перечислены даты наблюдений, инструменты и результаты фотометрии объектов из галактики NGC 4449.

Помимо наземных данных, для изучения кандидатов в NGC 4736, NGC 247, NGC 4449 использовались архивные данные космического телескопа HST. Да-

⁶<https://sha.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA/>

ты наблюдений, камеры, фильтры, время накопления и размеры используемых апертур для измерения потока от объекта и уровня фона приведены в таблице 3).

Изображения, полученные на телескопе HST, были взяты из архива Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST) ⁷. При наблюдениях использовались камеры WFPC2, ACS и WFC3.

Камера Wide Field and Planetary Camera 2 (WFPC2) - это прибор для получения двумерных изображений, охватывающее диапазон длин волн от Лайман- α до приблизительно 1 мкм. WFPC2 была установлена на HST во время Первой сервисной миссии в декабре 1993 года как замена исходной камеры Wide Field and Planetary Camera (WF/PC-1). Камера WFPC2 состояла из четырех идентичных детекторов ПЗС. Размер каждого детектора составлял 800×800 пикселей. Три из них (WF2, WF3, WF4), расположенные в форме буквы L и имеющие масштаб пикселя $\approx 0.1''/\text{пиксель}$, составляют широкоугольную камеру HST (WFC). Рядом с ними находится планетарная камера (PC или PC1) с масштабом пикселя около $0.05''/\text{пиксель}$, поля зрения которой составляет примерно $30''$.

Advanced Camera for Surveys (ACS) - это инструмент третьего поколения на борту HST. ACS имеет три независимых оптических канала с высоким разрешением, охватывающих области спектра от ультрафиолета до ближнего инфракрасного диапазона: широкоугольный канал WFC (Wide Field Channel), канал высокого разрешения HRC (High Resolution Channel) и канал SBC (Solar Blind Channel). WFC - это оптическая система с высокой пропускающей способностью, которая предназначена для получения глубоких обзоров в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах ($3500\text{--}11000 \text{ \AA}$). Детектор камеры состоит из двух одинаковых ПЗС размером 2048×4095 пикселей. Поле зрения прибора составляет $202'' \times 202''$, а масштаб изображения $0.05''/\text{пиксель}$.

Канал HRC используется для получения изображений высокого разрешения от ближнего ультрафиолетового до ближнего инфракрасного диапазона ($1700\text{--}11000 \text{ \AA}$). Этот детектор гораздо более чувствителен к ближнему ультрафио-

⁷<https://archive.stsci.edu/>

Таблица 3 — Журнал наблюдений HST. В колонке «Объекты»: J125057.26+410723.13, J125055.84+410625.44, J125103.35+410635.37 в галактике NGC 4736 обозначены как 1, 2, 3, соответственно; кандидаты J004703.27-204708.4 и J004702.18-204739.93 обозначены как 1 и 2, соответственно; J122810.94+440540.6, J122811.70+440550.9, J122817.83+440630.8 и J122809.72+440514.8 в галактике NGC 4449 обозначены цифрами 1, 2, 3 и 4, соответственно. В колонке «Фон» указан внутренний радиус и толщина кольца, в котором измерялся уровень фона вблизи объектов. Суммарное время накопления кадра отражено в колонке « T_{exp} ».

Дата	Камера	Фильтры	Объекты	T_{exp} , сек	Радиус аперт.,''	Фон, ''
NGC 4736						
2005-01-10	ACS/WFC	F435W	1,2,3	1200	0.15	0.25/0.15
		F555W		1000		
2005-01-11	ACS/WFC	F814W	1,2,3	900	0.15	0.25/0.15
NGC 247						
2011-10-11	ACS/WFC	F435W	1,2	257	0.15	0.25/0.2
		F606W		846		
2014-06-30	WFC3/IR	F105W	1,2	904	0.32	1.3/1.3
		F160W		303		
NGC 4449						
1995-05-10	WFPC2	F606W	1,2,3,4	160	—*	—*
1997-07-28	WFPC2	F170W	4	800	—*	—*
		F336W		520		
		F555W		200		
		F814W		200		
1998-01-09	WFPC2	F170W	1,2,3	800	—*	—*
		F336W		520		
		F555W		200		
		F814W		200		
2005-11-10	ACS/WFC	F435W	1,2	3660	0.15	0.25/0.20
		F555W		2460		
		F814W		2060		
2005-11-11	ACS/WFC	F435W	1,2,3,4	3479	0.25 (0.10/0.10)**	0.25/0.2 (0.3/0.2)**
		F555W		2460		
		F658N		360		
		F814W		2060		
2005-11-17	ACS/WFC	F814W	1,2,3,4	540	0.15	0.25/0.20
2005-11-18	ACS/WFC	F550M	1,2,3,4	1200	0.15	0.25/0.20
2006-01-26	ACS/HRC	F330W	1,2	1440	0.075	0.25/0.25
		F550M		760		
		F658N		240		
		F814W		312		
2014-07-09	WFC3/UVIS	F275W	1,2,3,4	2481	0.12	0.20/0.22
		F336W		2361		
2019-04-04	WFC3/IR	F110W	1,2,4	997	0.26	0.43/0.39
		F160W		1697		

Для данных камеры WFPC2 применялся метод PSF-фотометрии.

** Объект J122809.72+440514.8 имеет перекопленный центральный пиксель на изображениях F435W, F555W, F814W, полученных 2005-11-11, поэтому фотометрия выполнена в кольцевой апертуре (см. ниже). Радиусы кольца приведены в скобках.

летовому диапазону, чем детектор WFC. Поле зрения составляет $29'' \times 26''$, а масштаб изображения - $0.025''/\text{пиксель}$. Приемник HRC представляет собой матрицу из 1024×1024 пикселей размером 21 мкм. С 2007 года детектор HRC отключён из-за электрической неисправности.

Wide Field Camera 3 (WFC3) является наиболее технологически продвинутым инструментом космического телескопа им. Хаббла для получения изображений от ультрафиолетового до инфракрасного диапазона. Он был установлен в качестве замены камеры WFPC2 (Wide Field and Planetary Camera 2). Прибор имеет два независимых канала: УФ-оптический канал (UV/Visible channel, UVIS), в котором используется две матрицы для регистрации изображений в диапазоне $2000\text{-}10000 \text{ \AA}$; и детектор ближнего инфракрасного диапазона (near-infrared channel, IR), который охватывает диапазон длин волн от 8000 до 17000 \AA .

Канал UVIS имеет две ПЗС-матрицы, каждая из которых имеет размеры 2048×4096 пикселей, канал ИК имеет один детектор размером 1024×1024 . Поле зрения и масштаб изображения составляют $164'' \times 164''$ и $0.04''/\text{пиксель}$, и $123'' \times 136''$ и $0.13''/\text{пиксель}$ для каналов UVIS и IR соответственно.

1.3 Обработка спектральных данных

Спектральные данные, полученные на телескопах БТА, SALT и Subaru, обрабатывались в пакете программ MIDAS с использованием контекста LONG. Редукция данных телескопа БТА производилась стандартным образом. Удаление следов космических частиц на одиночном изображении выполнялось командой FILTER/COSMIC, которая содержит в качестве своих параметров среднюю величину уровня фона, gain в единицах e^-/ADU и шум считывания матрицы в ADU. Командой COMPUTE/IMAGE производилось вычитание среднего уровня электронного нуля (bias), предварительно вычисленного с помощью команды COMBINE/LONG. Деление на нормированное плоское поле (flat) так же выполнялось командой COMPUTE/IMAGE.

Перевод из пиксельных координат в систему координат, связанную с длинами волн (линеаризация), производился с использованием спектров калиб-

ровочных ламп (для БТА/SCORPIO - лампа He-Ne-Ar). Для этого последовательно выполнялись команды SET/LONG, SEARCH/LONG, IDENTIFY/LONG, CALIBRATE/LONG, RECTIFY/LONG с указанием их параметров, используя для проверки результатов некоторые промежуточные команды. После калибровки по длинам волн спектры объекта и стандарта исправлялись за поглощение в атмосфере. Коррекция осуществляется с помощью команды EXTINGTION/LONG, которая в качестве параметров содержит коэффициент *airmass*, характеризующий оптическую толщину на луче зрения, и таблицу с данными о зависимости поглощения от длины волны.

Экстракция одномерных спектров объекта и звезды-стандарта осуществлялась одним из двух способов в зависимости от количества объектов на щели. В случае, когда звезда одиночная и рядом с ней нет никаких других объектов, то экстракция спектра выполнялась простым суммированием строк двумерного изображения. Для этого предварительно осуществлялся учёт спектра неба с помощью команды SKYFIT/LONG, содержащей среди параметров степень аппроксимирующего фона неба полинома, и команды COMPUTE/IMAGE. Суммирование выделенных строк двумерного изображения, содержащих спектр исследуемого объекта, выполнялось командой AVERAGE/ROW с флажком *sum*.

Если же объект находится в тесном звёздном поле, то учёт фона неба и последующие шаги редукции усложняются. Для решения этой задачи использовалась программа SPEXTRA, разработанная А. Саркисяном в среде IDL и предназначенная для работы с тесными полями звёзд [112]. Программа работает с FITS-изображениями, и входным файлом служит линеаризованный двумерный спектр. На первом этапе двумерное изображение разделяется на 2 части, в каждой из которых делаются вертикальные разрезы изображения по каждому столбцу (вдоль пространственной оси) с последующим их усреднением. Кроме того, в некоторых случаях требовалось добавление разреза по столбцу, содержащему линии туманностей, для корректного вычитания их вклада в спектр объекта. Следующим шагом является выбор фона неба и степени аппроксимирующего полинома. Для каждого исследуемого объекта границы фона неба выбирались индивидуально. Далее задаётся количество и начальные параметры

функций Гаусса, описывающих распределение яркости в разрезах спектров изучаемого объекта и соседних звёзд. В качестве начальных параметров гауссиан указываются их приблизительные амплитуды, положения центра в пиксельных координатах и величина FWHM. Затем, произведя ряд итераций, программа выполняет экстракцию и выдает одномерный спектр объекта в формате FITS. Интенсивность полученного спектра выражена в отсчётах.

Последним шагом редукции являлся переход от инструментальных единиц плотности потока к энергетическим. Это осуществлялось с помощью спектров звезд-стандартов, которые наблюдались в том же спектральном диапазоне и, по возможности, на тех же зенитных расстояниях, что и объект. Обработка спектров стандартов выполнялась аналогично редукции спектров объектов. Кривые спектральной чувствительности для ПЗС вычислялись с использованием континуумов одномерного спектра звезды-стандарта в инструментальных единицах и табличных значений потоков в энергетических единицах, взятых из каталога звёзд-стандартов Европейской южной обсерватории⁸. Определение уровней континуума и их аппроксимация выполнялись командой `NORMAL/SPEC`, позволяющей пользователю на выведенном на дисплей спектре указать опорные точки. Переход от инструментальных величин к абсолютным потокам выполнялся делением одномерного спектра объекта на кривую спектральной чувствительности с учётом времени накопления спектра с помощью команды `COMPUT/IMAGE`.

Изображения, получаемые при наблюдениях на телескопе SALT, состоят из нескольких частей, поэтому первичная редукция спектральных данных, включающая в себя вычитание электронного нуля, деление на плоское поле и объединение частей в одно изображение выполнялось в пакете `PySALT` [113], разработанном на базе **Pyraf** специально для работы с изображениями, полученными на данном телескопе. Первичная обработка этих спектральных данных выполнена А. Ю. Князевым. Дальнейшая обработка, включающая в себя чистку двумерного спектра от следов космических частиц, калибровку по длинам волн, учёт атмосферной экстинкции и экстракция одномерного спектра объекта

⁸<https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards.html>

производилась аналогично обработке данных, полученных на телескопе БТА. При калибровке по длинам волн в качестве спектра сравнения использовался спектр ксеноновой лампы с наполнением.

Обработка спектральных данных, полученных на телескопе Subaru, проводилась аналогичным образом. Дополнительно к выше перечисленным шагам выполнялась коррекция геометрической дисторсии в пакете программ FOCASRED (реализован как пакет в **Pyraf**), предназначенном для работы с длиннощелевыми спектрами, полученными на спектрографе FOCAS. При переходе от пиксельных координат к длинам волн в качестве спектра сравнения использовался спектр лампы Th-Ar. В спектре торий-аргоновой лампы, используемой в спектрографе FOCAS, содержатся очень яркие линии в красной области спектра и более слабые линии в голубой области, поэтому при наблюдениях обычно получают два изображения спектра сравнения с разным временем экспозиции, которые в ходе редукации комбинировались в одно общее изображение.

1.4 Обработка фотометрических данных

1.4.1 Данные космических телескопов.

Для проведения фотометрических измерений по данным камер ACS и WFC3 телескопа HST выбирались суммарные и исправленные за дисторсию изображения в формате drz (drizzled) или изображения в формате drc, которые дополнительно скорректированы за снижение эффективности переноса заряда (СТЕ-corrected). Стандартная первичная обработка данных с ACS и WFC3 включает в себя вычитание уровня электронного нуля (bias) и темнового тока (dark), коррекцию за плоское поле, учет «горячих» пикселей, удаление следов космических частиц, калибровку по потокам и учёт времени экспозиции кадров. Для ИК фотометрии по архивным данным Spitzer/IAC также выбирались изображения, прошедшие первичную обработку. Для всех перечисленных данных была выполнена абсолютная фотометрия в системе звёздных величин VEGAMAG. Измерение потоков от источников по данным камер ACS и WFC3, а также камеры IAC, проводилось методом апертурной фотометрии в пакете программ APPHOT в среде **IRAF**. Выбранные радиусы круговых апертур для

объектов и радиусы кольцевых апертур для определения уровня фона по данным HST приведены в таблице 3. Значение апертурных поправок вычислялось на основе фотометрии одиночных ярких звёзд в большой и малой апертурах, размеры последней соответствовали радиусам апертур, в которых измерялся поток исследуемых объектов.

Измерения звёздных величин источников по данным HST/WFPC2 выполнялись методом PSF-фотометрии в программе **HSTphot** [114]. Для измерения потоков использовались изображения формата `_c0f.fits`, а для учёта горячих пикселей использовались изображения формата `_c1f.fits`. **HSTphot** использует предвычисленные PSF для каждого фильтра, что в отсутствие ярких одиночных звёзд позволяет решить проблему расчета апертурных поправок. Кроме того, программа включает в себя алгоритм расчета CTE-поправок для камеры WFPC2, достигающих нескольких десятых звездной величины в случае слабых накоплений.

Для сравнения с результатами фотометрии, выполненной по данным наземных телескопов, измеренные по данным HST звёздные величины переводились в стандартную систему Джонсона-Козинса с использованием команды CALSPHOT пакета PySynphot, реализованном на языке **PYRAF**. Для перехода к стандартной фотометрической системе для всех объектов (кроме перевода потоков J122811.70+440550.9 и J122809.72+440514.8 в фильтрах F330W и F336W в фильтр U, см. ниже) использовался степенной закон $F_\lambda \sim \lambda^\alpha$ со значениями спектральных индексов α , которые определялись по величинам потоков в двух соседних фильтрах.

Для исследования звёздных ассоциаций вблизи LBV кандидатов в галактиках NGC 247 и NGC 4449 (см. ниже) выполнялась PSF фотометрия по данным камеры ACS телескопа HST. Этот метод наилучшим образом подходит для измерения потоков большого количества объектов, а также для тесных полей звёзд. Фотометрические измерения выбранных частей кадров были выполнены с использованием пакета программ **DOLPHOT** [115], который был адаптирован для общего пользования из пакета фотометрии **HSTphot**, предназначенного для фотометрии снимков, полученных с помощью камеры WFPC2 телескопа имени

Хаббла. Для фотометрических измерений в **DOLPHOT** используются изображения `_flt.fits`, которые исправлены за плоское поле, но не скорректированы за снижения эффективности переноса заряда. В качестве опорного изображения, относительно которого измеряются и исправляются смещения между отдельными кадрами `_flt.fits`, используются исправленные за дисторсию изображения в формате `_drz.fits` (или `_drc.fits`).

Первым шагом работы в пакете программ **DOLPHOT** является запуск процедуры `ACSMASK`, которая позволяет замаскировать все пиксели, отмеченные как плохие. Затем с помощью команды `SPLITGROUPS` изображение разбивается на отдельные части, соответствующие разным чипам матрицы. Следующим этапом подготовки данных является измерение уровня фона неба с использованием процедуры `CALCSKY`. Последним шагом подготовки изображений является исправление смещений между опорным изображением и изображениями, по которым проводятся фотометрические измерения, с помощью программы `ACSFITDISTORT`. Далее запускается непосредственно команда `DOLPHOT`, которая и осуществляет измерения потоков всех найденных на изображениях звездообразных объектов.

Суммарная ошибка абсолютной фотометрии, выполненной по данным HST, обуславливается статистической ошибкой измерения потока, точностью перевода в стандартную систему звёздных величин [116, 117], стабильностью нуля-пункта⁹ и стабильностью PSF в каждом конкретном наблюдении (например, [118]). Погрешности, связанные с инструментом, имеют характерное значение 1-3 %, поэтому величины суммарных ошибок фотометрии составили не лучше 3 % даже в тех случаях, когда статистические погрешности были незначительными.

1.4.2 Данные наземных телескопов.

Изображения наземных телескопов были взяты из электронных архивов соответствующих обсерваторий или из базы внегалактических данных NED

⁹<https://www.stsci.edu/hst/instrumentation/wfc3/data-analysis/photometric-calibration>,
https://www.stsci.edu/itt/review/ihb_cy15/ACS/c03_intro_acs6.html

(NASA/IPAC Extragalactic Database)¹⁰. Первичная редукция изображений с телескопов БТА, Цейсс-1000, 2.5-м КГО ГАИШ и некоторых архивных изображений проводилась в MIDAS стандартным образом, что включало в себя вычитание темнового тока и деление на плоское поле, полученного по сумеречному небу. Фотометрические измерения в случае объектов из галактик NGC 4736 и NGC 247 также выполнялись в пакете программ APPHOT на базе IRAF методом апертурной фотометрии относительно выбранных звёзд сравнения, количество которых составляло от 11 до 22. Оптимальный радиус апертур для измерения потока от объекта и определения уровня фона выбирался исходя из размера звёздного изображения в каждом конкретном наблюдении.

Определение звёздных величин объектов из галактики NGC 4449 по наземным данным производилось методом PSF фотометрии в пакете программ DAOPHOT [119]. Запуск программы производится командой DAOPHOT. Затем процедурой OPTIONS задаются параметры, отвечающие за поиск источников по кадру и за построение подходящей модели PSF. Команда ATTACH позволяет указать изображение, которое будет использоваться для фотометрических измерений. Затем применяется команда FIND для поиска звездообразных источников на прикрепленном ранее кадре. При выполнении этой процедуры создается текстовый файл, содержащий порядковый номер источников, присваиваемый командой FIND автоматически, их пиксельные координаты, грубую оценку их звёздных величин относительно нуля-пункта, определяемого из заданного значения порога обнаружения источников THRESHOLD, а также параметры SHARP и ROUND, характеризующие тип источника (одиночная звезда, космическая частица, галактика, неразрешённая двойная и т.д.).

Следующим стандартным шагом алгоритма является получение более точных оценок звёздных величин звездообразных источников, обнаруженных командой FIND, методом апертурной фотометрии. Для этого используется процедура PHOTOMETRY, в качестве параметров которой необходимо задать радиусы апертур и кольца, в котором определяется фон. Эта команда определяет потоки в заранее заданных апертурах для всех источников. По ходу выполнения

¹⁰<https://ned.ipac.caltech.edu/>

фотометрии команда PHOTOMETRY создаёт файл с результатами, где содержатся звездные величины в заданных апертурах, ошибки фотометрии, локальный фон около источника и прочие параметры. Полученный файл может быть отсортирован по возрастанию (увеличению) видимых звёздных величин. Затем командой PICK создаётся список наиболее ярких, далёких от края изображения и от перекопленных источников звёзд, которые могут быть использованы для построения модели PSF.

Процедура PSF позволяет в интерактивном режиме отобразить наиболее подходящие для построения PSF звёзды, провести аппроксимацию их профилей заданным аналитическим выражением, определить при необходимости изменение параметров PSF или рассчитать поправки к аналитической PSF. Программа ALLSTAR производит точное измерение видимых звёздных величин источников с тесных полей. В качестве параметров этой команды нужно задать FITTING RADIUS - радиус, внутри которого будет вписываться PSF, INNER и OUTER SKY RADIUS - внутренний и внешний радиусы кольца, внутри которого будет определяться фон неба. В ходе выполнения программы создаётся текстовый файл с результатами, который в дальнейшем может быть использован для анализа.

Абсолютная калибровка результатов фотометрии для каждого объекта (за исключением данных в фильтре U для J122809.72+440514.8, см. ниже) по наземным наблюдениям проводилась с помощью опорных звёзд, абсолютные потоки которых измерялись по изображениям HST.

1.4.3 Особенности фотометрии отдельных объектов

J125057.26+410723.13. Объект J125057.26+410723.13 расположен внутри группы относительно слабых звезд, разрешить которую при наземных наблюдениях не представляется возможным. Кроме того, на расстоянии $0.64''$ от объекта расположена яркая звезда, блеск которой всего на 1 звездную величину слабее, чем у J125057.26+410723.13. По этим причинам на каждом наземном изображении было принято решение измерить общий поток всех звезд, попадающих в данную апертуру. Радиусы апертуры составляли от $0.75''$ до $1.3''$ в зависимости от

размера изображения в конкретном наблюдении. Затем вклад объекта в суммарный поток в данной конкретной апертуре был отделён от вклада других звёзд с использованием изображений, полученных 2005/01/10 с помощью камеры ACS/WFC телескопа HST. Для этого по данным HST был получен как общий поток, так и поток от объекта (путем измерения в малой $0.15''$ и применения апертурных поправок) в тех же апертурах, что на наземных данных, после чего был оценён вклад других звезд. В предположении постоянства блеска звёзд поля, и с использованием найденного вклада этих звёзд в суммарный поток в апертурах был найден поток от объекта на наземных изображениях.

Ошибки общих потоков от звёзд в заданных апертурах, измеренных по наземным данным, находятся в диапазоне $0.07 - 0.16^m$. Полученные звёздные величины объекта и их ошибки после исключения вклада звёзд поля приведены в таблице 4.

J004703.27-204708.4 и J004702.18-204739.93. Фотометрические измерения были выполнены методом апертурной фотометрии относительно 13 звёзд сравнения. Размеры апертуры составляли от 0.3 до $1.2''$ в зависимости от размера звёздного изображения в каждом конкретном наблюдении. Уровень фона измерялся в местах изображения без источников в кольцевых апертурах, размер которых также выбирался в зависимости от размера звёздного изображения.

Для выполнения абсолютной фотометрии по алгоритму, описанному выше, использовались архивные изображения HST (таблица 3). Полоса пропускания фильтра F435W близка к полосе пропускания фильтра V стандартной системы, тогда как полоса пропускания фильтра F606W находится между V и R, а её пик близок к линии $H\alpha$. Поэтому для предотвращения завышения полученных при пересчёте в фильтр V звёздных величин из-за присутствия ярких эмиссионных линий $H\alpha$ в спектрах объектов, был оценён вклад линии $H\alpha$ в поток. Для этого выполнялась свёртка наблюдаемых спектров объектов в абсолютных потоках и нормированных спектров с кривой пропускания фильтра F606W, и вычислялась разница полученных синтетических звёздных величин, которая, затем, вычиталась из наблюдаемых потоков в фильтре F606W. Все оптические

величины приведены в таблице 6.

Потоки источников J004703.27-204708.4 и J004702.18-204739.93 в ИК-диапазоне измерялись по архивным данным телескопа Spitzer в полосах 3.6 и 4.5 мкм камеры IRAC¹¹. Наблюдения в других фильтрах IRAC не анализировались из-за их низкого пространственного разрешения. Определение звёздных величин объектов выполнялось методом абсолютной фотометрии в апертуре 0.9", выбор размера которых был обусловлен тесным полем звёзд. Уровень фона определялся в кольцевой апертуре с внутренним радиусом 1.5" и толщиной 0.9". Апертурные поправки рассчитывались с помощью фотометрических измерений одиночных ярких звёзд в больших (6") и малых апертурах (0.9"). Полученные результаты фотометрии для одиночных звёзд сравнивались с фотометрией из каталога точечных источников Spitzer [120]. Результаты совпали в пределах ошибок для выбранных опорных звёзд и для объекта J004702.18-204739.93, в то время как потоки от источника J004703.27-204708.4 (вместе с ближайшей звездой, для отделения вклада которой недостаточно пространственного разрешения фильтров Spitzer) в фильтрах 3.6 мкм и 4.5 мкм оказались ниже на 25 и 15 процентов соответственно, что связано с более точным учетом фона в проведенных нами измерениях. Путём экстраполяции спектрального наклона между потоками в полосах F105W и F160W (камера WFC3/IR HST) в диапазоне 3.6 и 4.5 мкм был оценён вклад ближайшей звезды в общий поток на уровне 10%. Поток от источника J004703.27-204708.4, измеренный в апертуре 0.9", включает в себя значительную часть потока компактной туманности, окружающей данный объект, и часть потока близлежащей звездной ассоциации, значение которого невозможно оценить достоверно. Результаты фотометрии по данным Spitzer также приведены в таблице 7.

J122810.94+440540.6, J122811.70+440550.9, J122817.83+440630.8 и J122809.72+440514.8 Определение видимых звёздных величин объектов по данным наземных телескопов производилось методом PSF фотометрии. Абсолютная калибровка наземных наблюдений в полосах BVR_cI_c проводилась по опорным звездам, потоки которых измерялись по изображениям HST.

¹¹ Данные получены из архива <https://sha.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA>

Калибровка звёздной величины в фильтре U 2.5-метрового телескопа ГАИШ МГУ производилась по звёздам-стандартам из фотометрического каталога SDSS [121] для избежания некорректной оценки потоков звёзд с бальмеровским скачком. Это связано с тем, что U-фильтр центрирован ($\lambda_c \approx 3600\text{\AA}$) практически точно на границу бальмеровской серии водорода, в то время как кривые пропускания фильтров F336W (камера WFC3/UVIS HST) и F330W (ACS/HRC HST) покрывают эту длину волны только своим "красным" крылом. Суммарная ошибка фотометрии, полученная по наземным данным, включает себя статистическую ошибку измерения потока, ошибку абсолютной калибровки, а также вариации фона вокруг объектов. В таблице 8 перечислены используемые в наблюдениях телескопы, даты наблюдений и результаты фотометрии.

Объекты J122810.94+440540.6 и J122811.70+440550.9 имеют по соседству близкие звёзды, сравнимые с ними по яркости (и даже превышающие ее в красных фильтрах), и находятся в окружении множества слабых звёзд, что усложняет учёт фона. Поэтому измерение звёздных величин этих объектов по данным наземных телескопов возможно только при очень хороших изображениях звёзд. К сожалению, имеющиеся наземные данные не позволяют оценить звёздные величины этих объектов, поэтому в таблице 8 приведены измерения, выполненные по данным HST.

Полученные по данным HST звёздные величины были переведены в стандартную систему Джонсона-Козинса для удобства сравнения с результатами наземной фотометрии. Для объектов J122810.94+440540.6 и J122817.83+440630.8, в спектральных распределениях энергии которых не наблюдается бальмеровский скачок, был использован степенной закон и спектральные индексы, определяемые по звёздным величинам в двух соседних фильтрах. Спектры J122811.70+440550.9 и J122809.72+440514.8 показывают наличие бальмеровского скачка (см. ниже), который оказывает влияние на перевод звёздных величин из фильтров F336W и F330W. Поэтому для преобразования звёздных величин в этих фильтрах в полосу U стандартной системы использовались модельные спектры: в случае J122809.72+440514.8 применялась модель протяженной атмосферы, рассчитанная с помощью кода CMFGEN, а для

случая J122811.70+440550.9 использовалась модель спектрального распределения энергии с учетом значительного вклада свободно-свободного и свободно-связанного излучения (см. главу 3). Звёздные величины в остальных фильтрах были преобразованы по степенному закону со спектральными индексами, рассчитанными описанным выше способом.

Выводы

В текущей главе описана методика первичного отбора объектов для исследования и отбор LBV-кандидатов на основе полученных спектральных данных, а также кратко изложены результаты отбора. Приведено описание основных приборов, которые были использованы для получения наблюдательных данных. В данной главе изложены основные этапы обработки спектральных данных, полученных на телескопах SALT/RSS, Subaru/FOCAS, БТА/SCORPIO в среде **MIDAS**. Также приведено описание особенностей выполнения обработки спектральных данных для каждого из инструментов, а также подробно описан метод экстракции спектров звёзд в тесном поле с помощью пакета программ SPEXTRA.

Кроме того, в главе даётся подробное описание методов фотометрии, применяемых в работе, в том числе апертурной и PSF-фотометрии, выполняемой в программах **DOLPHOT** и в **DAOPHOT**. Описаны особенности фотометрических измерений некоторых из изучаемых объектов. Анализ полученных спектроскопических и фотометрических данных приведён в следующей главе.

2 Фотометрия и спектроскопия кандидатов в галактиках NGC 4736, NGC 247, NGC 4449

Данная глава описывает результаты спектроскопии кандидатов в галактиках NGC 4736, NGC 247, NGC 4449, проведённой на телескопах БТА, SALT и Subaru. В этой главе также приведены результаты фотометрии объектов, выполненной по данным как наземных, так и космических телескопов.

2.1 J125057.26+410723.13

Несмотря на низкую точность определения звёздной величины по наземным данным (рисунок 11, таблица 4), звезда J125057.26+410723.13 в галактике NGC 4736 демонстрирует явный тренд падения блеска. Изменения звёздной величины достигают $\Delta V = 1.18 \pm 0.12^m$ и $\Delta B = 0.90 \pm 0.12^m$ с 2005 (HST) по 2018 годы (2.5-м КГО ГАИШ). Очевидно, что такое сильное изменение яркости не может быть объяснено ни ошибками калибровки, ни ошибками, связанными с оценкой потока звезды. На рисунке 12 показана зависимость показателя цвета $B-V$ от изменения яркости в полосах B и V и их аппроксимация квадратичным полиномом. Зависимости имеют вид

$$B - V = -0.442(B - 19.0)^2 + 0.326(B - 19.0) + 0.123 \text{ (рис. 12, справа)}$$

$$B - V = -0.161(V - 19.0)^2 - 0.023(V - 19.0) + 0.190 \text{ (рис. 12, слева).}$$

При этом значение приведённого хи-квадрата составило $\chi^2/dof = 0.48$ и $\chi^2/dof = 0.26$ со степенью свободы $dof=2$. Подобный вид зависимости изменения цвета от изменения звёздной величины характерен для хорошо изученных LBV звёзд, например, для V532 (звезда Романо) из галактики M 33 (рисунок 3 в работе [99]) и для AF And из галактики M 31 (рисунок 3 в работе [122]). Эта зависимость отражает рост температуры фотосферы с уменьшением блеска звезды в течение цикла переменности S Dor.

Спектр J125057.26+410723.13, полученные в 2015 году с помощью гризмы VRHG1200G. (рисунок 14), показывает особенности, характерные для подтверждённых звёзд LBV: широкие и яркие линии водорода, линии He I, многочисленные разрешённые и запрещённые линии железа Fe II и [Fe II]. Наблюдаются также запрещённые линии [Ar III], [N II], [S II], которые, вероятно, формируются

Таблица 4 — Результаты оптической фотометрии объектов галактики NGC 4736. Столбцы содержат названия телескопов, даты наблюдений и звёздные величины, не исправленные за межзвёздное поглощение.

Телескоп	Дата	B, mag	V, mag
J125057.26+410723.13			
JKT	1994-08-12	20.07 ± 0.19	19.56 ± 0.12
Palomar 60 inch	1999-02-08	19.28 ± 0.24	–
KPNO 2.1m	2002-04-14	19.75 ± 0.09	19.57 ± 0.13
HST	2005-01-10	19.31 ± 0.03	19.13 ± 0.03
BTA	2014-04-27	19.52 ± 0.10	19.49 ± 0.16
BTA	2015-01-18	–	19.41 ± 0.13
BTA	2017-03-31	–	20.42 ± 0.42
Zeiss1000	2017-12-13	20.19 ± 0.33	–
Zeiss1000	2017-12-29	20.00 ± 0.24	20.39 ± 0.49
BTA	2018-02-19	20.31 ± 0.33	20.68 ± 0.40
BTA	2018-04-13	20.57 ± 0.36	21.01 ± 0.63
2.5-m,SAI MSU	2018-04-29	20.22 ± 0.12	20.31 ± 0.12
J125055.84+410625.44			
JKT	1994-08-12	20.05 ± 0.11	19.95 ± 0.10
KPNO 2.1m	2002-04-14	20.05 ± 0.05	19.99 ± 0.07
HST	2005-01-10	19.80 ± 0.03	19.72 ± 0.03
BTA	2014-04-27	19.77 ± 0.05	19.66 ± 0.06
BTA	2015-01-18	–	20.05 ± 0.07
BTA	2017-03-31	–	19.92 ± 0.10
Zeiss1000	2017-12-13	19.76 ± 0.08	–
Zeiss1000	2017-12-29	19.83 ± 0.08	19.72 ± 0.08
BTA	2018-02-19	20.01 ± 0.10	20.02 ± 0.11
BTA	2018-04-13	20.04 ± 0.08	19.99 ± 0.09
2.5-m,SAI MSU	2018-04-29	20.20 ± 0.05	20.21 ± 0.06
J125103.35+410635.37			
KPNO 2.1m	2002-04-14	20.78 ± 0.05	20.66 ± 0.07
HST	2005-01-10	20.77 ± 0.03	20.58 ± 0.03
BTA	2015-01-18	–	20.77 ± 0.09
BTA	2017-03-31	–	20.51 ± 0.09
2.5-m,SAI MSU	2018-04-29	20.83 ± 0.11	20.71 ± 0.07

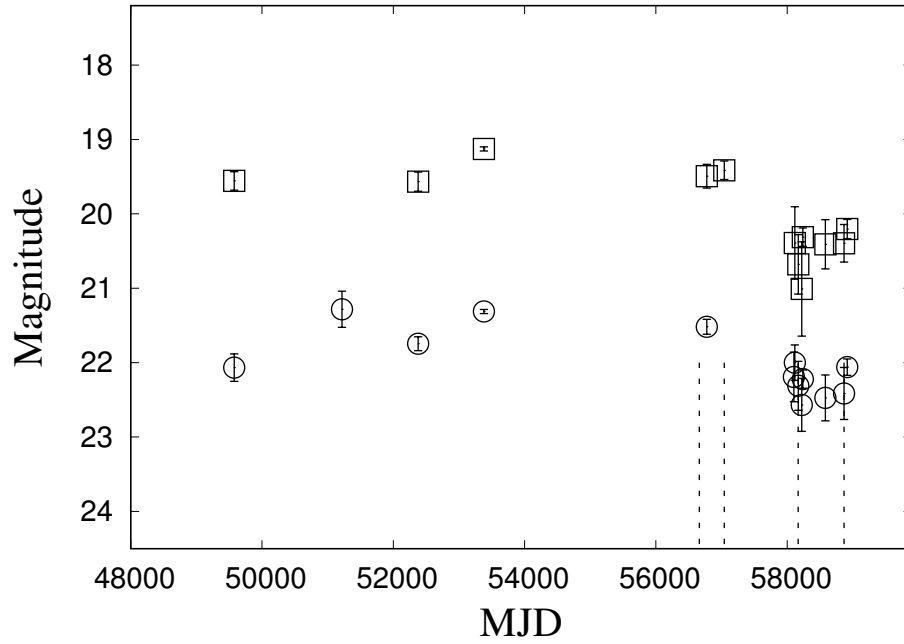


Рисунок 11 — Кривая блеска объекта J125057.26+410723.13 в полосах В (кружки) и V (квадраты). Для лучшей визуализации данных кривая блеска в фильтре В смещена вниз на 2 звёздных величины.

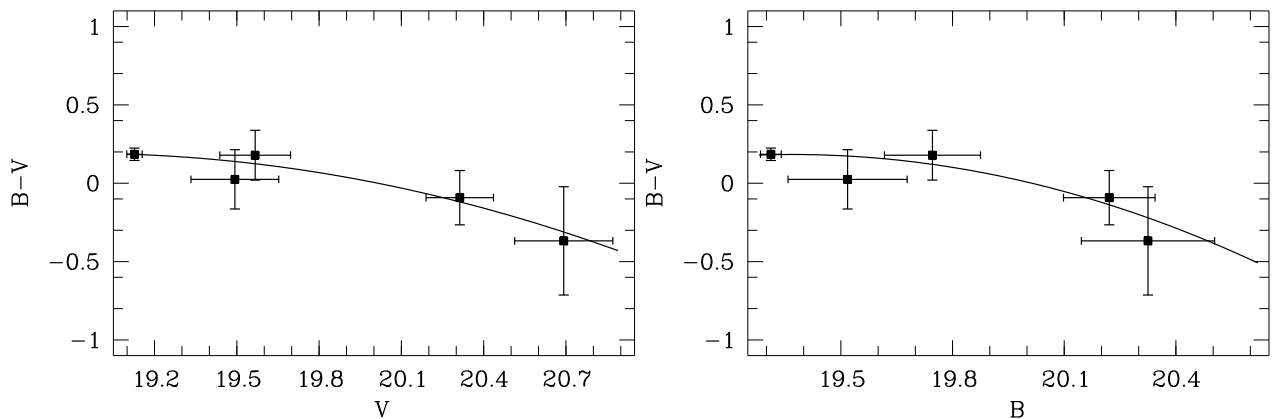


Рисунок 12 — Зависимость звёздная величина - показатель цвета в фильтре V (слева) и в фильтре В (справа) для J125057.26+410723.13.

в окружающей объект туманности.

Спектр, полученный в 2018 году, имеет значительные изменения по сравнению со спектром, полученным в 2015 году: линии Fe II и He I стали почти неразличимыми на фоне непрерывного спектра, а широкий компонент линии $H\beta$ значительно ослаблен. Изменения в спектре сопровождаются уменьшением яркости на $\approx 1^m$ в полосе V с 2015 по 2018, что может соответствовать повышению температуры фотосферы. Подобное поведение блеска схоже с переменностью типа S Dor, характерной для многих LBV звёзд. Спектр, полученный в 2020 году, не показывает явных изменений по сравнению со спектром, по-

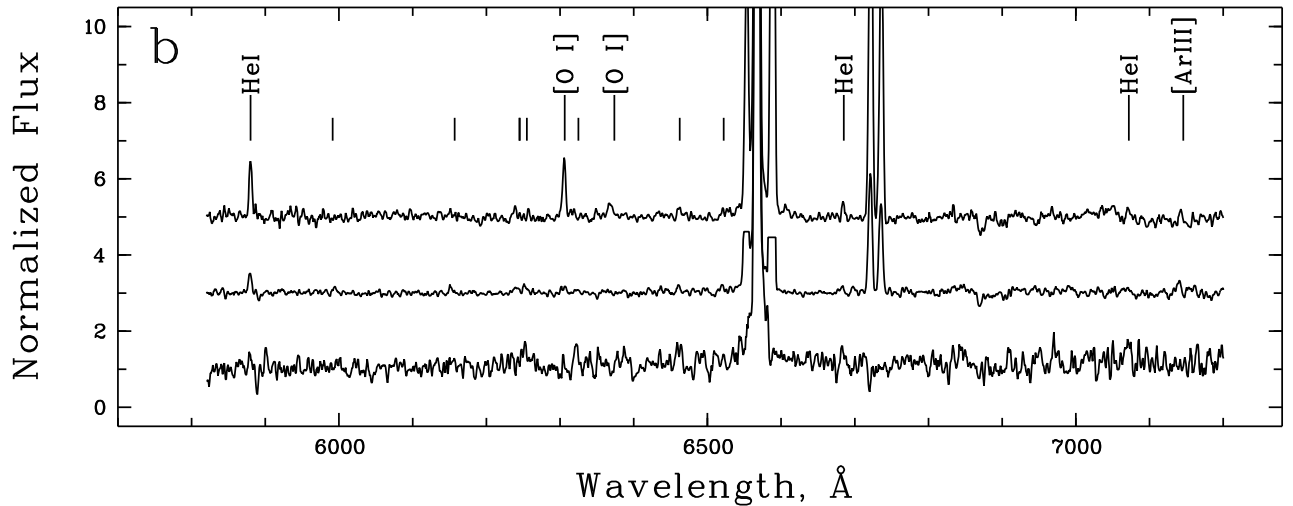


Рисунок 13 — Спектры J125103.35+410635.37 (верхний), J125057.26+410723.13 (средний) и J125055.84+410625.44 (нижний), полученные на БТА/SCORPIO/VRHG1200R. Неподписанные короткие и длинные штрихи обозначают линии Fe II и [Fe II] соответственно. Узкие компоненты $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$ and $H\delta$, запрещенные линии [O III], [N I], [O I], [N II] и [S II] излучаются окружающими туманностями.

лученным в 2018. Более того, фотометрическая переменность также не была обнаружена за период с 2018 по 2020 год (см. рисунок 11).

Кроме того, по данным длиннощелевой спектроскопии удалось оценить величину межзвёздного поглощения для объекта на основе наблюдаемого соотношения потоков водородных линий Бальмеровской серии окружающей туманности. Для случая фотоионизованной плазмы бальмеровский декремент для газовых туманностей составляет $H\alpha/H\beta = 2.87$, $H\gamma/H\beta = 0.47$, $H\delta/H\beta = 0.26$ и не изменяется с точностью около 5% для широкого диапазона физических условий в туманности [123]. При этом наблюдаемые отношения потоков в линиях бальмеровской серии зависят от величины межзвездного покраснения и могут быть теоретически рассчитаны при заданном законе межзвездного поглощения. По наблюдаемому соотношению потоков в водородных линиях туманности была получена оценка межзвёздного поглощения $A_V = 1.0 \pm 0.1^m$.

2.2 J125055.84+410625.44

По данным, полученным на 6-м телескопе БТА (2014) и 2.5-м КГО ГА-ИШ (2018), вариации блеска кандидата J125055.84+410625.44 составили $\Delta B = 0.43 \pm 0.07^m$ и $\Delta V = 0.55 \pm 0.08^m$ в соответствующих полосах (рисунок 15, таблица 4).

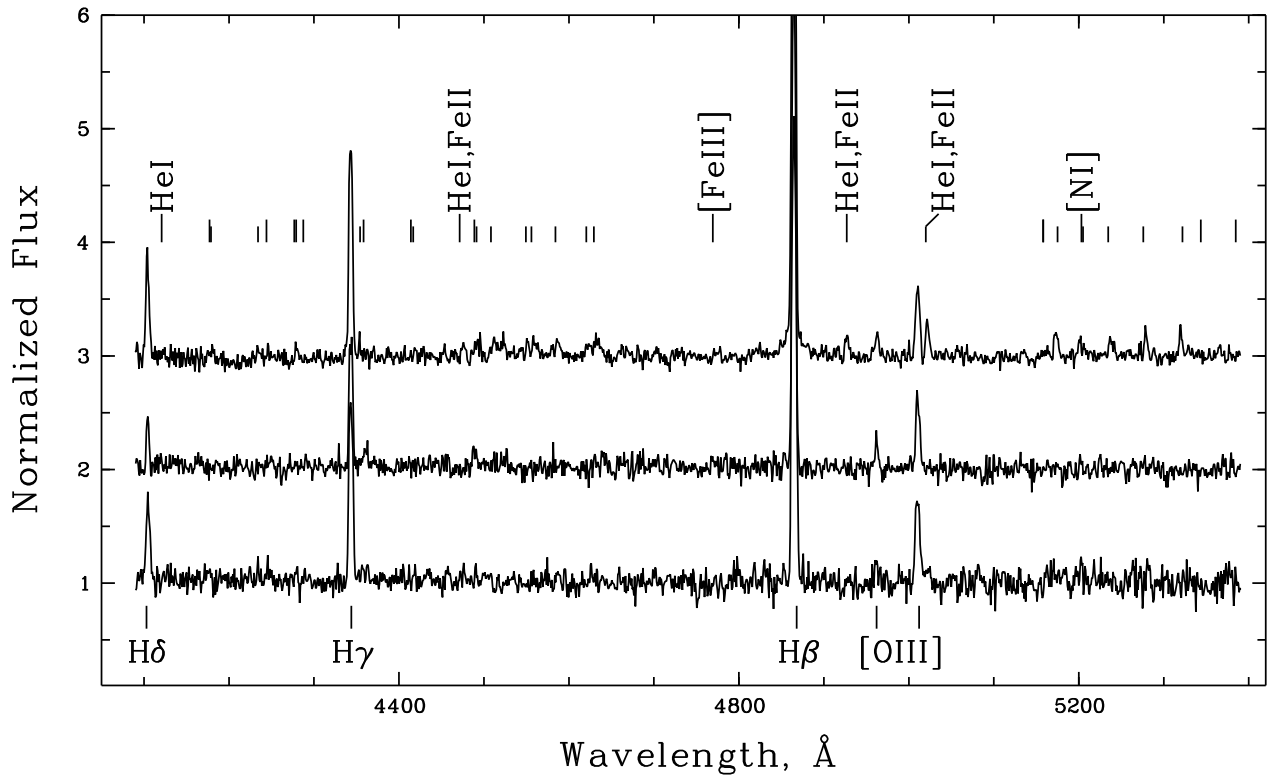


Рисунок 14 — Спектры J125057.26+410723.13, полученные в 2015 г. (вверху), 2018 г. (в центре) и 2020 г. (внизу) на БТА/SCORPIO/VPHG1200B(G). Обозначены основные спектральные линии. Неподписанные короткие и длинные штрихи обозначают линии Fe II и [Fe II] соответственно.

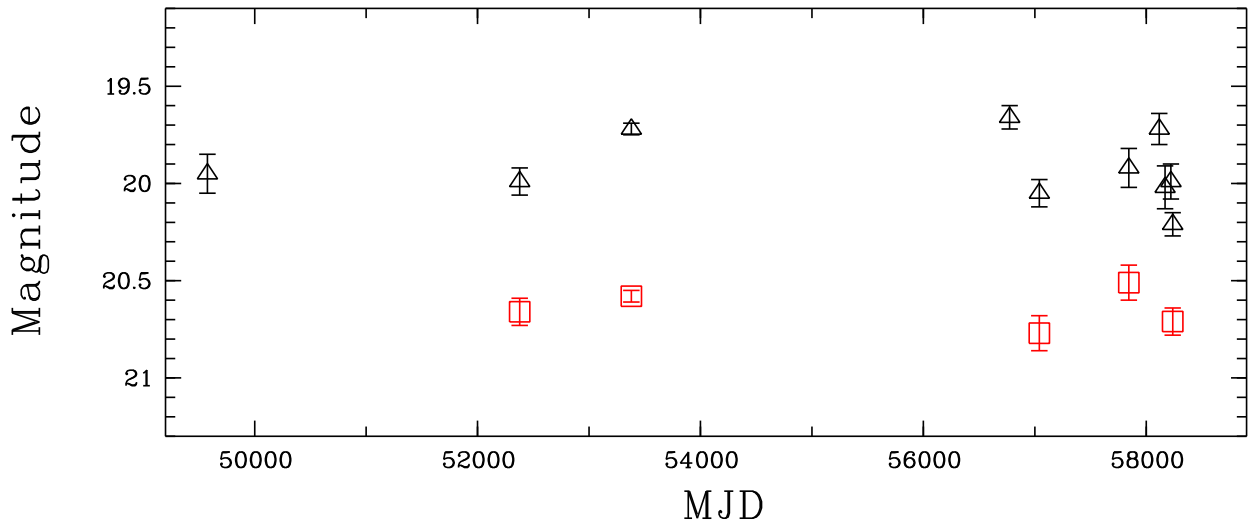


Рисунок 15 — Кривые блеска J125055.84+410625.44 (чёрные символы) и J125103.35+410635.37 (красные символы) в полосе V.

Значимым отличием этого объекта от остальных звёзд является отсутствие туманности в его окрестностях и изолированность от ярких молодых звёзд. В спектре J125055.84+410625.44 (рис. 16) наблюдаются линии He I с профилями P Cyg и многочисленные эмиссионные линии железа Fe II. Линии $H\beta$ и $H\alpha$ (рисунок 17) имеют асимметричные профили, которые, вероятно, явля-

ются неразрешёнными профилями типа Р Cуг. В спектре, полученном в 2018 году, крылья линии Бальмеровской серии водорода стали более интенсивными, чем при наблюдениях 2015 года. В таблице 5 приведены эквивалентные ширины наиболее ярких линий, измеренные по спектрам 2015 и 2018 годов. Измерение эквивалентных ширин линий, наблюдаемых в спектре данного объекта, возможно благодаря отсутствию вклада излучения туманности. Кроме того, в период с 2015 по 2018 год наблюдалось небольшое понижение блеска $\Delta V \approx 0.2^m$ в полосе V.

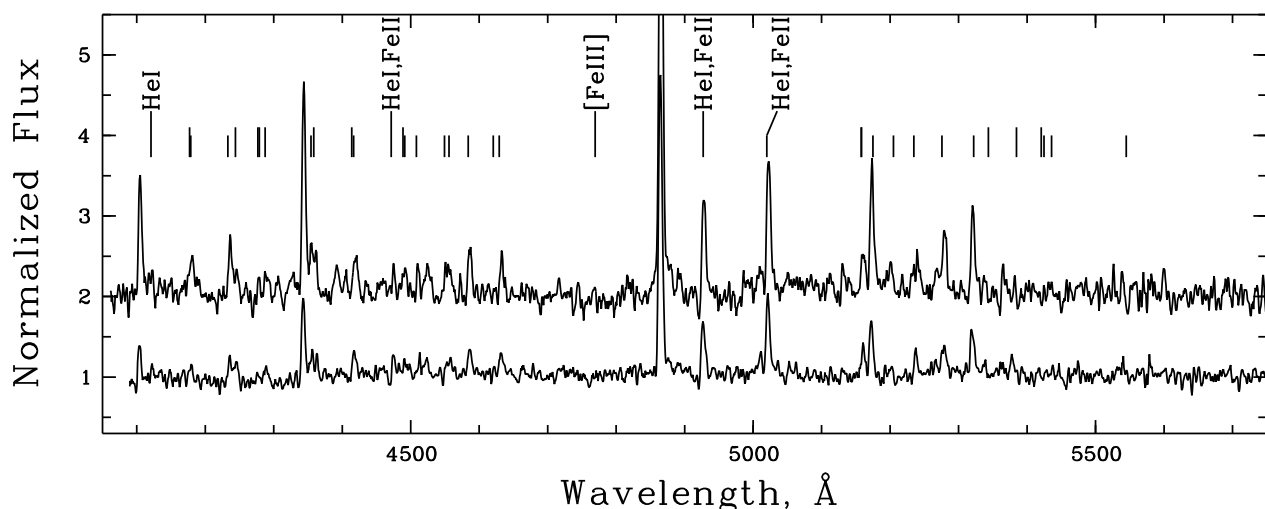


Рисунок 16 — Спектры J125055.84+410625.44, полученные в 2015 г. (верхний) и 2018 г. (нижний) на БТА/SCORPIO/VRHG1200G. Обозначены основные спектральные линии. Неотмеченные короткие и длинные штрихи обозначают линии Fe II и [Fe II] соответственно.

2.3 J125103.35+410635.37

Изменение блеска кандидата J125103.35+410635.37 незначительно и составляет $\Delta V = 0.13 \pm 0.08^m$ в фильтре V по данным телескопов HST и 2.5-м КГО ГАИШ МГУ (рисунок 15, таблица 4).

В спектре объекта J125103.35+410635.37 содержатся узкие бальмеровские линии водорода, эмиссионные линии He I, запрещенные линии [O III], [O I], [N I], [N II] и [S II], которые формируются преимущественно (или целиком) в газе окружающей туманности (рисунки 13 и 18). Широкие компоненты бальмеровских линий, которые также наблюдаются в спектре J125103.35+410635.37, являются наблюдательным проявлением ветра.

Из соотношения потоков водородных линий туманности $H\delta/H\beta$ и $H\gamma/H\beta$,

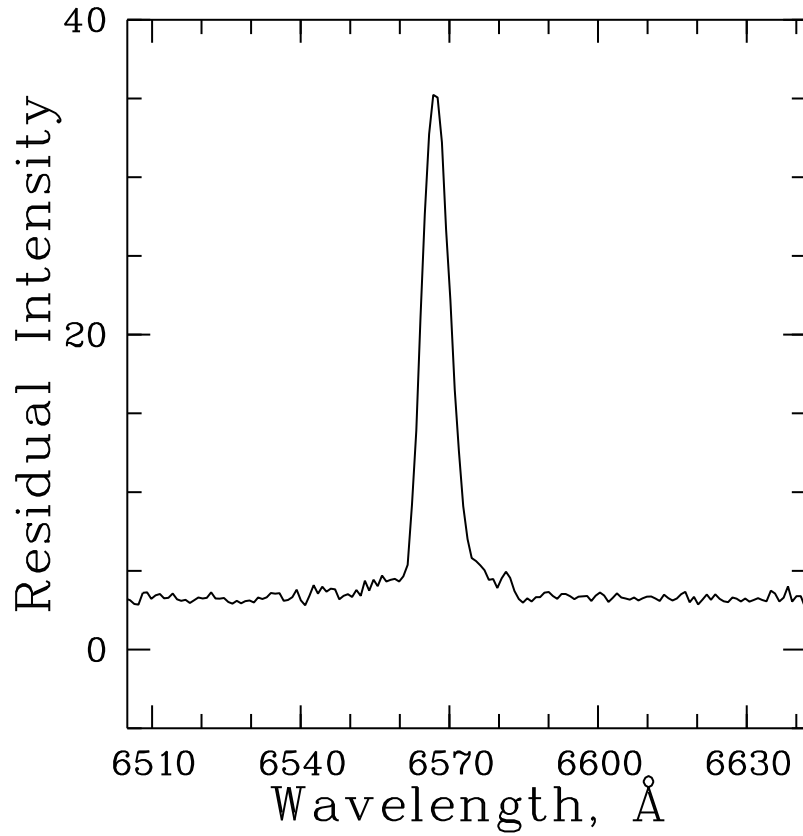


Рисунок 17 — Линия $H\alpha$ в спектре J125055.84+410625.44, полученном в 2014 году.

Таблица 5 — Эквивалентные ширины (EW) линий в спектрах J125055.84+410625.44, полученных в 2015 и 2018 годах на телескопе БТА/SCORPIO.

Линия	EW, Å(2015 год)	EW, Å(2018 год)
H δ	-7.05 ± 0.40	-7.20 ± 0.13
H γ	-10.99 ± 0.64	-12.65 ± 0.46
Fe II(4352.8Å)	-2.99 ± 0.32	-3.12 ± 0.10
[Fe II](4414.6Å)	-3.62 ± 0.15	-3.43 ± 0.09
Fe II(4522.6Å)	-2.77 ± 0.34	-2.91 ± 0.04
Fe II + Fe II(4549.5 + 4555.9)Å	-3.71 ± 0.15	-3.49 ± 0.17
Fe II(4583.3Å)	-4.46 ± 0.19	-3.57 ± 0.05
Fe II + N II(4629.3 + 4630.5)Å	-4.01 ± 0.10	-2.93 ± 0.06
H β	-36.52 ± 0.62	-33.54 ± 0.63
He I + Fe II(4921.9 + 4923.9)Å	-8.19 ± 0.23	-7.11 ± 0.37
He I + Fe II(5015.6 + 5018.4)Å	-10.96 ± 0.17	-9.08 ± 0.14
Fe II(5169.0Å)	-7.70 ± 0.19	-6.46 ± 0.09
[Fe II](5157.6Å)	-3.85 ± 0.57	-2.24 ± 0.32
Fe II(5197.6Å)	-2.39 ± 0.31	-1.24 ± 0.14
Fe II(5264.8Å)	-2.02 ± 0.39	-1.44 ± 0.09
Fe II(5275.9Å)	-4.83 ± 0.18	-3.95 ± 0.07
Fe II(5316.8Å)	-5.17 ± 0.45	-5.07 ± 0.13

наблюдаемых в спектре J125103.35+410635.37, была получена оценка межзвёздного поглощения $A_V = 0.47 \pm 0.21^m$ описанным выше методом.

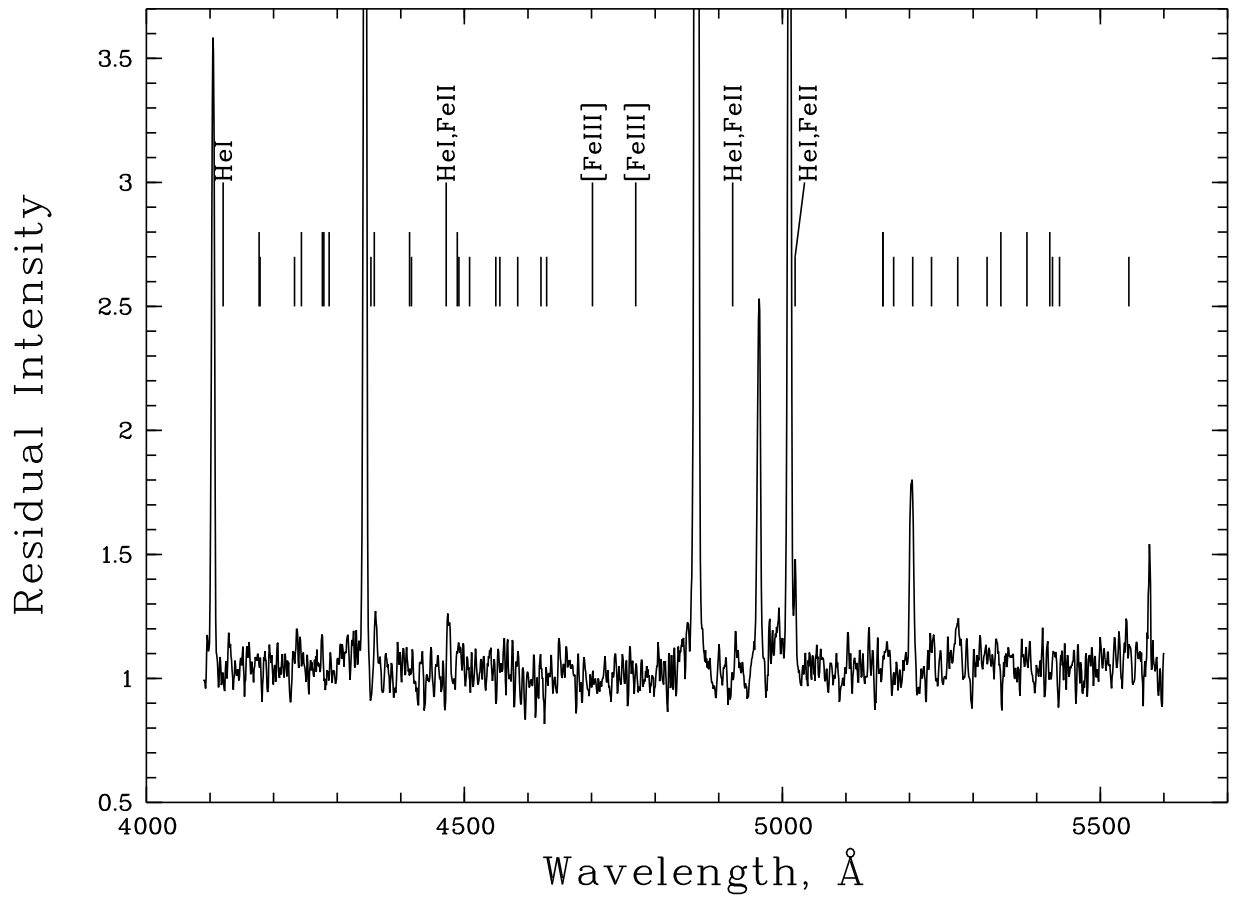


Рисунок 18 — Спектр J125103.35+410635.37, полученный в 2017 году на телескопе БТА/SCORPIO/VRHG1200G. Обозначены основные спектральные линии. Короткие и длинные штрихи обозначают линии Fe II и [Fe II] соответственно.

2.4 J004703.27-204708.4

Объект J004703.27-204708.4 в NGC 247 продемонстрировал значительную переменность блеска с 2005 (данные 2.2-m ESO/MPG/WFI) по 2011 годы (данные HST/ACS/WFC): изменения звёздных величин источника в полосах B и V составили $\Delta B = 0.74 \pm 0.09^m$ и $\Delta V = 0.88 \pm 0.09^m$ соответственно, что заметно превышает уровень 3σ . С 2011 по 2018 годы кандидат испытывал небольшое поярчание $\Delta V = 0.34 \pm 0.10^m$. Кривая блеска этого объекта показана на рисунке 19, звёздные величины приведены в таблице 6.

Спектр объекта, полученный на телескопе Subaru представлен на рисунке 20. Он показывает широкие и яркие эмиссионные линии водорода и гелия HeI с профилями P Cyg, множество эмиссионных линий железа Fe II, кремния Si II и слабые эмиссионные линии азота N II $\lambda 4631$ и углерода C II $\lambda 7053$. Запрещённая эмиссионная линия азота [N II] $\lambda 5755$ формируется в звёздном

Таблица 6 — Результаты оптической фотометрии объектов галактики NGC 247. В колонках перечислены инструменты, даты и звёздные величины, не исправленные за межзвёздное поглощение.

Телескоп	Дата	U, mag	B, mag	V, mag	R, mag	I, mag
J004703.27-204708.4						
2.2m ESO/MPG	2002/10/08	—	19.39 ± 0.08	19.27 ± 0.08	—	—
2.2m ESO/MPG	2003/06/24	—	19.29 ± 0.07	19.17 ± 0.08	—	—
2.2m ESO/MPG	2003/10/19	—	—	19.17 ± 0.07	—	—
2.2m ESO/MPG	2003/10/22	—	19.30 ± 0.07	—	—	—
ESO/VLT/FORS2	2004/06/19	—	19.38 ± 0.05	19.22 ± 0.06	—	—
2.2m ESO/MPG	2004/10/17	—	19.28 ± 0.09	19.17 ± 0.07	—	—
2.2m ESO/MPG	2005/01/06	—	—	19.10 ± 0.09	—	—
2.2m ESO/MPG	2005/06/09	—	—	18.83 ± 0.08	—	—
2.2m ESO/MPG	2005/09/26	—	19.15 ± 0.08	19.01 ± 0.09	—	—
2.2m ESO/MPG	2006/09/25	—	19.30 ± 0.08	19.22 ± 0.10	—	—
HST/ACS/WFC	2011/10/11	—	19.89 ± 0.04	19.71 ± 0.04	—	—
Subaru	2016/10/09*	18.83 ± 0.10	19.54 ± 0.11	19.45 ± 0.09	19.13 ± 0.09	19.10 ± 0.09
2.5-m, SAI MSU	2018/09/20	—	—	19.37 ± 0.10	19.01 ± 0.10	—
J004702.18-204739.93						
JKT	1994/08/16	—	18.94 ± 0.09	—	18.81 ± 0.10	—
Danish 1.54-m	1997/09/08	18.27 ± 0.12	18.82 ± 0.07	18.89 ± 0.07	18.90 ± 0.11	—
2.2m ESO/MPG	2002/10/08	—	19.08 ± 0.07	18.96 ± 0.08	—	—
2.2m ESO/MPG	2003/06/24	—	19.01 ± 0.06	18.94 ± 0.07	—	—
2.2m ESO/MPG	2003/10/19	—	—	18.88 ± 0.07	—	—
2.2m ESO/MPG	2003/10/22	—	18.96 ± 0.07	—	—	—
ESO/VLT/FORS2	2004/06/19	—	19.02 ± 0.05	18.96 ± 0.06	—	—
2.2m ESO/MPG	2004/10/17	—	19.09 ± 0.07	18.98 ± 0.06	—	—
2.2m ESO/MPG	2005/06/09	—	—	18.94 ± 0.08	—	—
2.2m ESO/MPG	2005/09/26	—	18.95 ± 0.06	18.87 ± 0.08	—	—
2.2m ESO/MPG	2006/09/25	—	18.98 ± 0.07	—	—	—
CTIO 0.9m	2009/08/21	18.16 ± 0.13	18.82 ± 0.10	18.88 ± 0.11	18.87 ± 0.11	—
HST/ACS/WFC	2011/10/11	—	18.83 ± 0.03	18.71 ± 0.04	—	—
Subaru	2016/10/09	18.38 ± 0.10	18.97 ± 0.10	18.97 ± 0.09	18.78 ± 0.09	18.63 ± 0.09
2.5-m, SAI MSU	2018/09/20*	—	—	19.00 ± 0.08	18.88 ± 0.09	—
Zeiss-1000, SAO RAS	2019/11/15	—	19.03 ± 0.16	18.95 ± 0.10	18.87 ± 0.11	—

Заметки. * Эти фотометрические наблюдения проводились одновременно или квазиодновременно со спектроскопией.

Таблица 7 — Результаты ИК-фотометрии.

Object	HST/WFC3/IR (2014/06/30)		Spitzer/IRAC (2012/10/17)	
	F105W, mag	F160W, mag	3.6 μ m, mag	4.5 μ m, mag
J004703.27-204708.4	19.17 ± 0.04	18.57 ± 0.04	16.20 ± 0.16	16.09 ± 0.14
J004702.18-204739.93	18.67 ± 0.04	18.13 ± 0.04	15.91 ± 0.13	15.25 ± 0.11

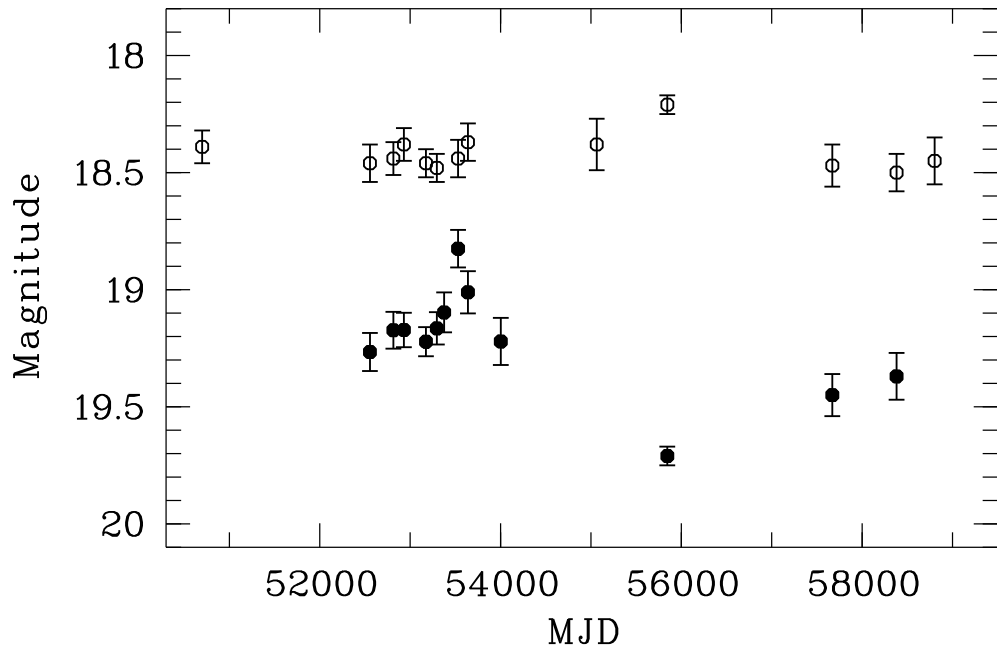


Рисунок 19 — Кривые блеска J004702.18-204739.93 (незаполненные символы) и J004703.27-204708.4 (заполненные символы) в полосе V. Для лучшей визуализации кривая блеска J004702.18-204739.93 была смещена на -0.5^m .

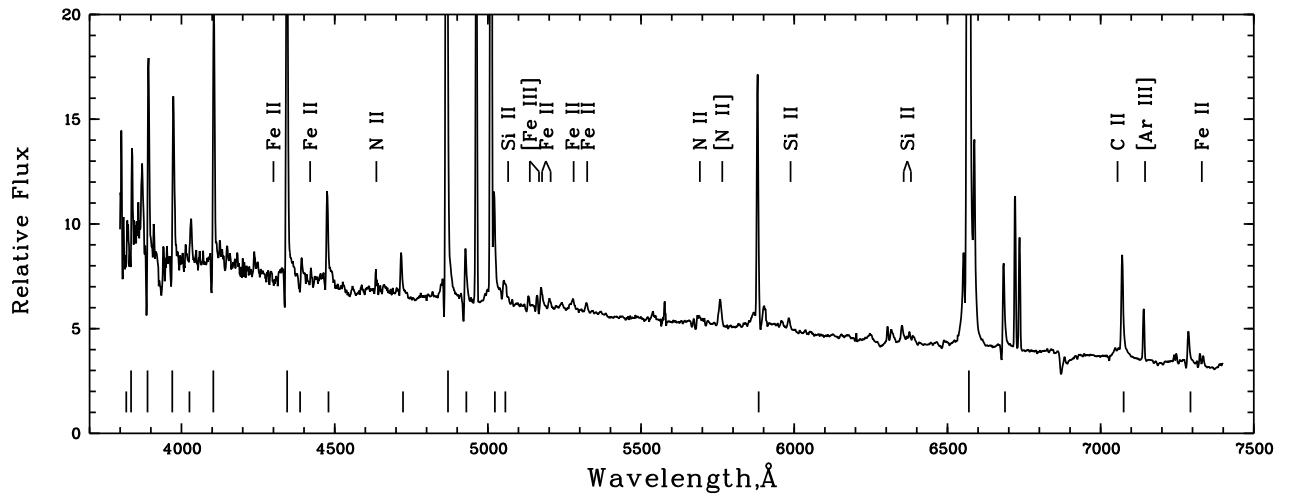


Рисунок 20 — Спектр J004703.27-204708.4, полученный на телескопе Subaru. Короткими и длинными неподписанными штрихами обозначены линии гелия He I и линии водорода бальмеровской серии H соответственно.

ветре [124,125], поэтому её полная ширина на половине максимума (FWHM) отражает терминальную скорость ветра. FWHM этой линии измерялась с учётом спектрального разрешения инструмента, что дало оценку терминальной скорости $V_\infty = 464 \pm 26 \text{ km/s}^{-1}$. Другие яркие эмиссионные запрещенные линии [O III], [Ar III], [N II] $\lambda 6548$, $\lambda 6583$, [S II] $\lambda 6717$, $\lambda 6731$, вероятно, излучаются окружающей объект туманностью. На рисунке 21 приведены спектры J004703.27-204708.4, полученные на телескопах SALT (11/11/2017) и Subaru

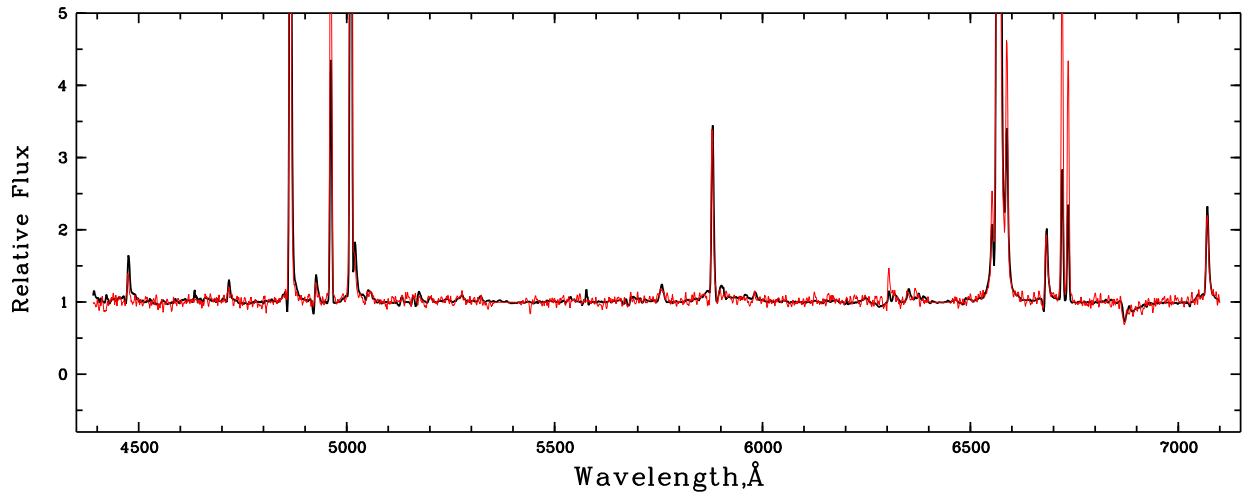


Рисунок 21 — Спектры J004703.27-204708.4, полученные на телескопах Subaru (черный) и SALT(красный).

(09/10/2016). Несмотря на то, что во время наблюдений 11/11/2017 на SALT кандидат J004703.27-204708.4 не удалось отделить от соседней яркой звезды и был получен лишь их суммарный спектр, сколь-либо значительных изменений между спектрами на рисунке 21 не отмечается.

По наблюдаемому соотношению потоков в водородных линиях окружающей туманности было оценено межзвёздное поглощение $A_V = 0.80 \pm 0.10^m$.

2.5 J004702.18-204739.93

Фотометрическая переменность (таблица 6) J004702.18-204739.93 составила $\Delta V \approx 0.29 \pm 0.09^m$ с 2011 (данные HST/ACS/WFC) по 2018 годы (данные 2.5-m, SAI MSU), что лишь незначительно превышает уровень 3σ . Кривая блеска этого объекта показана незаполненными символами на рисунке 19.

Спектр J004702.18-204739.93 (рисунок 22), полученный на телескопе SALT, содержит широкие эмиссионные бальмеровские линии $H\alpha$, $H\beta$, а также большое количество линий железа Fe II. Многочисленные запрещенные линии железа [Fe II], образующиеся в газе оболочки, окружающей звезду, указывают на мощное истечение звёздного вещества. В спектре объекта также содержатся запрещенные эмиссионные линии [Ca II] $\lambda\lambda$ 7291,7324 и [O I] $\lambda\lambda$ 6300,6364. Межзвёздное поглощение, измеренное по соотношению наблюдаемых бальмеровских водородных линий в окружающей туманности, составляет $A_V = 0.90 \pm 0.20^m$.

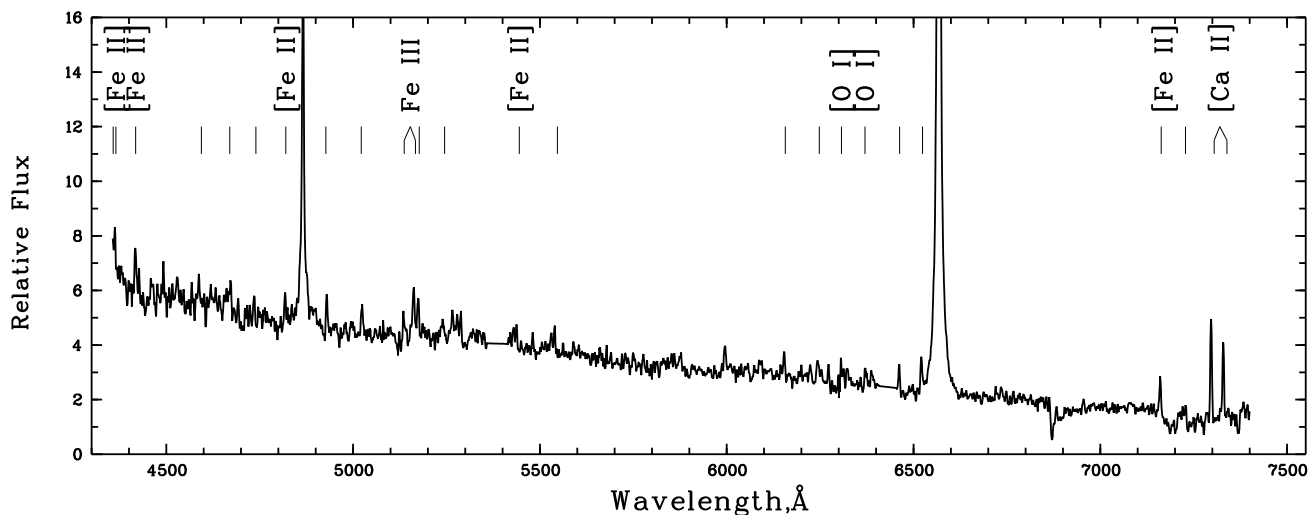


Рисунок 22 — Спектр J004702.18-204739.93, полученный на телескопе SALT. Неподписанные штрихи обозначают линии железа Fe II.

2.6 J122810.94+440540.6

Фотометрические измерения J122810.94+440540.6 в NGC 4449 не выявили значительное изменение блеска (рисунок 23): максимальное изменение звёздной величины составило $\Delta U = 0.29 \pm 0.06^m$ (таблица 8).

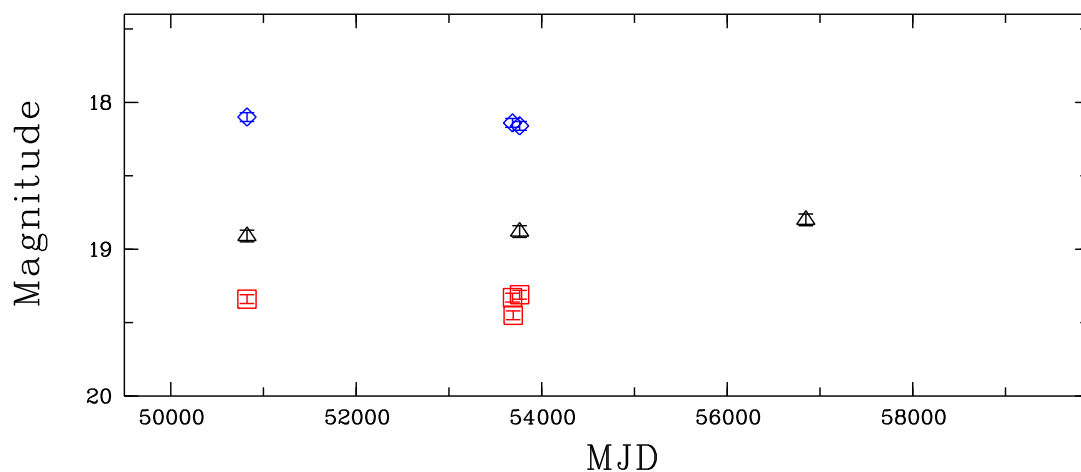


Рисунок 23 — Кривые блеска J122810.94+440540.6 в фильтрах U (треугольники), V (квадраты) и I (ромбы). Для лучшей визуализации кривая блеска в полосе I смещена на -0.5^m .

Спектры J122810.94+440540.6, полученные на телескопе БТА, приведены на рисунке 24. Они содержат эмиссионные линии водорода бальмеровской серии с явными широкими компонентами. Наличие узких компонент линий водорода, связанных с излучением туманности, затрудняет оценку FWHM широких компонент. В спектрах этого объекта так же содержится большое количество эмиссионных линий железа Fe II, [Fe II] и слабые линии He I. Последние, вероятно,

Таблица 8 — Результаты оптической фотометрии объектов галактики NGC 4449. В колонках перечислены инструменты, даты и звёздные величины, не исправленные за межзвёздное поглощение.

Телескоп	Дата	F170W, mag	F275W, mag	U, mag (F336W)*	B, mag	V, mag	R, mag	I, mag
J122810.94+440540.6								
WFPC2	1995/05/10	—	—	—	—	—	19.15 ± 0.04	—
WFPC2	1998/01/09	> 20.00	—	18.91 ± 0.04	—	19.34 ± 0.03	—	18.60 ± 0.03
ACS/WFC	2005/11/10	—	—	—	—	19.34 ± 0.03	—	18.63 ± 0.03
ACS/WFC	2005/11/11	—	—	—	19.67 ± 0.03	19.33 ± 0.03	—	18.64 ± 0.03
ACS/WFC	2005/11/17	—	—	—	—	—	—	18.67 ± 0.03
ACS/WFC	2005/11/18	—	—	—	—	19.45 ± 0.03	—	—
ACS/HRC	2006/01/26	—	—	19.09 ± 0.04	19.60 ± 0.03	19.31 ± 0.03	—	18.66 ± 0.03
WFC3/UVIS	2014/07/09	—	19.69 ± 0.05	18.80 ± 0.04	—	—	—	—
J122811.70+440550.9								
WFPC2	1995/05/10	—	—	—	—	—	19.74 ± 0.04	—
WFPC2	1998/01/09	18.83 ± 0.11	—	19.19 ± 0.04	—	20.19 ± 0.03	—	19.50 ± 0.03
ACS/WFC	2005/11/10	—	—	—	—	20.12 ± 0.03	—	19.48 ± 0.03
ACS/WFC	2005/11/11	—	—	—	20.29 ± 0.03	20.15 ± 0.03	—	19.51 ± 0.03
ACS/WFC	2005/11/17	—	—	—	—	—	—	19.47 ± 0.03
ACS/WFC	2005/11/18	—	—	—	—	20.25 ± 0.03	—	—
ACS/HRC	2006/01/26	—	—	19.33 ± 0.04	20.32 ± 0.03	20.28 ± 0.04	—	19.60 ± 0.03
WFC3/UVIS	2014/07/09	—	18.40 ± 0.05	19.12 ± 0.04	—	—	—	—
J122817.83+440630.8								
WFPC2	1995/05/10	—	—	—	—	—	22.03 ± 0.06	—
WFPC2	1998/01/09	> 20.29	—	21.25 ± 0.08	—	22.01 ± 0.06	—	21.60 ± 0.07
BOK	2001/03/31	—	—	—	—	—	19.88 ± 0.12	—
ACS/WFC	2005/11/11	—	—	—	20.98 ± 0.03	20.69 ± 0.03	—	20.03 ± 0.03
ACS/WFC	2005/11/17	—	—	—	—	—	—	20.00 ± 0.03
ACS/WFC	2005/11/18	—	—	—	—	20.72 ± 0.03	—	—
WFC3/UVIS	2014/07/09	—	21.28 ± 0.05	21.79 ± 0.03	—	—	—	—
2.5m CMO	2020/03/07	—	—	—	—	—	22.04 ± 0.20	—
J122809.72+440514.8								
WFPC2	1995/05/10	—	—	—	—	—	18.22 ± 0.04	—
WFPC2	1997/07/28	> 20.20	—	18.14 ± 0.03	—	17.98 ± 0.04	—	17.48 ± 0.03
BOK	2001/03/31	—	—	—	—	—	17.71 ± 0.11	—
ACS/WFC	2005/11/11	—	—	—	18.30 ± 0.08	18.05 ± 0.09	—	17.56 ± 0.07
ACS/WFC	2005/11/17	—	—	—	—	—	—	17.50 ± 0.03
ACS/WFC	2005/11/18	—	—	—	—	17.94 ± 0.03	—	—
WFC3/UVIS	2014/07/09	—	19.19 ± 0.05	17.98 ± 0.03	—	—	—	—
BTA	2018/02/18	—	—	—	18.61 ± 0.15	18.23 ± 0.15	18.01 ± 0.11	17.73 ± 0.07
2.5m CMO	2019/01/18	—	—	—	18.49 ± 0.11	18.13 ± 0.10	18.02 ± 0.07	—
Zeiss-1000	2019/04/09	—	—	—	18.53 ± 0.09	18.28 ± 0.09	—	—
Zeiss-1000	2019/05/22	—	—	—	18.51 ± 0.11	18.16 ± 0.09	—	—
Zeiss-1000	2019/11/24	—	—	—	18.60 ± 0.18	18.28 ± 0.06	18.18 ± 0.11	—
BTA	2020/01/18	—	—	—	18.61 ± 0.21	18.38 ± 0.19	—	—
Zeiss-1000	2020/02/17	—	—	—	—	18.46 ± 0.14	18.20 ± 0.05	18.17 ± 0.13
2.5m CMO	2020/03/07	—	—	17.72 ± 0.13	18.51 ± 0.09	18.32 ± 0.07	18.14 ± 0.06	18.02 ± 0.11
Zeiss-1000	2020/11/14	—	—	—	18.60 ± 0.16	18.28 ± 0.10	18.19 ± 0.07	18.03 ± 0.12
2.5m CMO	2020/12/03	—	—	—	18.54 ± 0.08	18.27 ± 0.12	18.17 ± 0.08	—
2.5m CMO	2021/03/05	—	—	—	18.48 ± 0.13	18.23 ± 0.05	18.13 ± 0.07	—

Notes. * Смотрите в тексте

Таблица 9 — Результаты фотометрии в фильтре $H\alpha$ в ближнем ИК диапазоне.

Object	HST/ACS/WFC	HST/ACS/HRC	HST/WFC3/IR	
	(2005/11/11)	(2006/01/26)	(2019/04/04)	
	F658N, mag	F658N, mag	F110W, mag	F160W, mag
J122810.94+440540.6	–	17.44 ± 0.05^m	18.46 ± 0.03	18.06 ± 0.04
J122811.70+440550.9	–	17.41 ± 0.05^m	19.35 ± 0.03	18.87 ± 0.04
J122817.83+440630.8	18.33 ± 0.05^m	–	–	–
J122809.72+440514.8	17.44 ± 0.05^m	–	17.83 ± 0.02	17.57 ± 0.02

формируются в туманности, поскольку их FWHM соответствует спектральному разрешению. Яркие эмиссионные линии [O III] $\lambda 4959$, $\lambda 5007$, [N II] $\lambda 6548$, $\lambda 6583$, [S II] $\lambda 6717$, $\lambda 6731$, возможно, принадлежат окружающей объект туманности. В спектрах, полученных в 2015 и 2020 годах, не наблюдается значительного изменения потока и формы линий. Из соотношения водородных линий окружающей туманности была получена оценка межзвёздного поглощения $A_V = 0.2 \pm 0.2^m$ аналогично предыдущим случаям.

2.7 J122811.70+440550.9

Фотометрия по данным HST не выявила существенного изменения блеска J122811.70+440550.9 (рисунок 25). Проведённая фотометрия после учёта вклада в поток окружения J122811.70+440550.9 показывает, что изменение блеска звезды не превышает 0.2^m .

Спектры J122811.70+440550.9 (рисунок 26) демонстрируют очень широкие линии водорода $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$ и $H\delta$, множество эмиссионных линий железа Fe II, [Fe II], а также линии He I. Кроме того, в спектре присутствуют линии [O I] $\lambda\lambda$ 6300, 6363, однако установить источник излучения довольно сложно, поскольку эти линии могут излучаться как фоновой туманностью, так и газопылевой оболочкой объекта. В спектрах, полученных в 2015 и 2020 годах, не прослеживается сколь-либо значительного изменения линий. Межзвёздное поглощение $A_V = 0.3 \pm 0.2^m$ оценивалось аналогично предыдущим случаям на основании соотношения линий водорода, излучаемых окружающей объект туманностью.

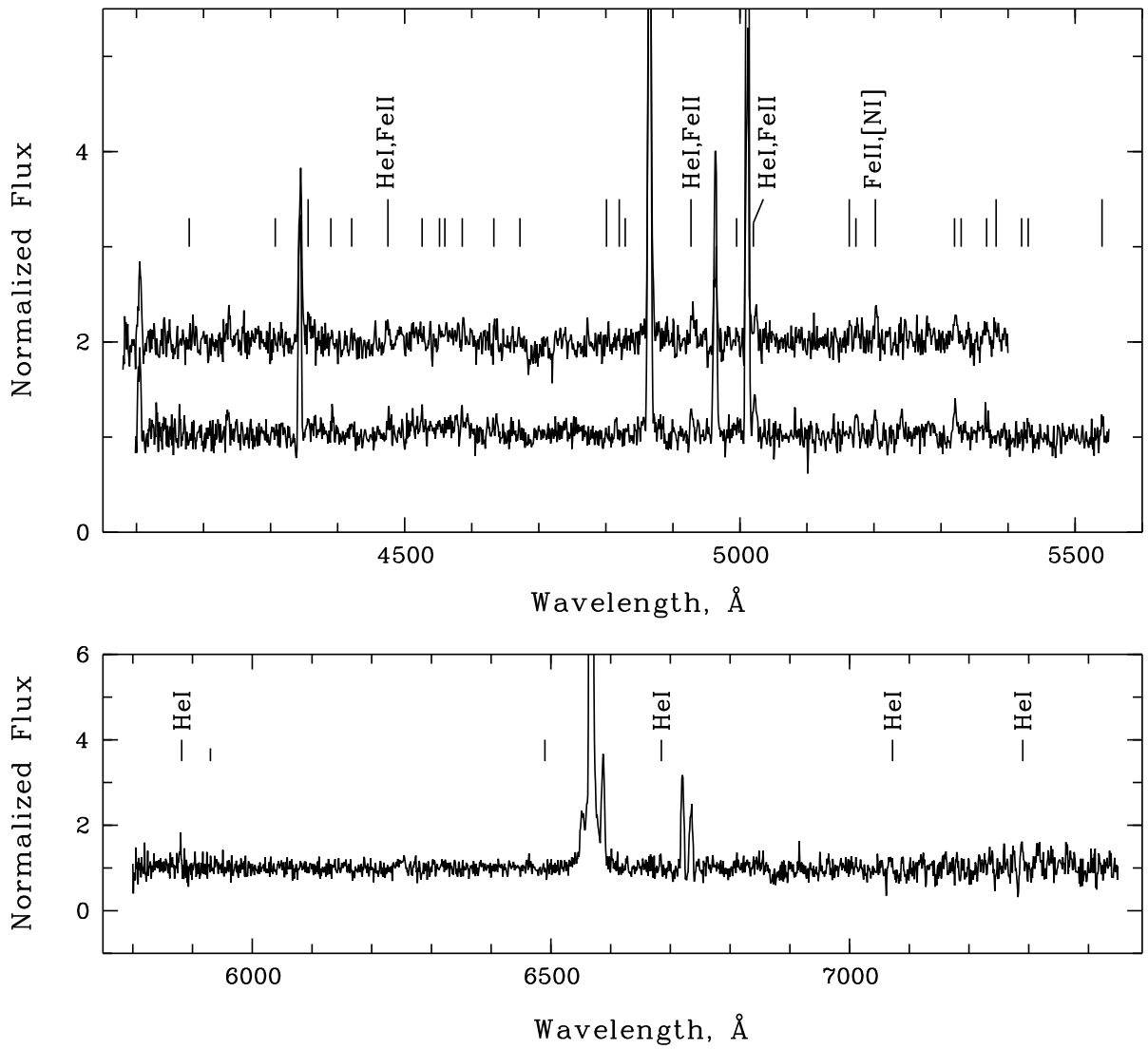


Рисунок 24 — Нормированные спектры J122810.94+440540.6, полученные в 2015 (верхняя панель, нижний спектр, БТА/SCORPIO/VPHG1200G) и 2020 (верхняя панель, верхний спектр, БТА/SCORPIO/VPHG1200B), и в 2014 (нижняя панель, БТА/SCORPIO/VPHG1200R) годах. Неподписанные короткие и длинные штрихи обозначают линии железа Fe II и [Fe II] соответственно.

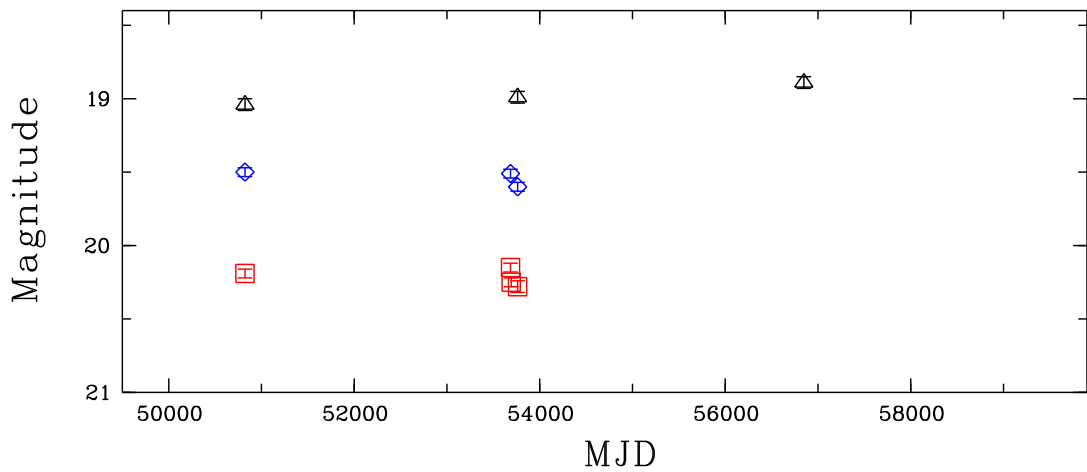


Рисунок 25 — Кривые блеска J122811.70+440550.9 в полосах U (треугольники), V (квадраты) and I (ромбы) bands. Для лучшей визуализации кривые блеска в фильтрах V и I смещены на -0.5^m и -1.0^m соответственно.

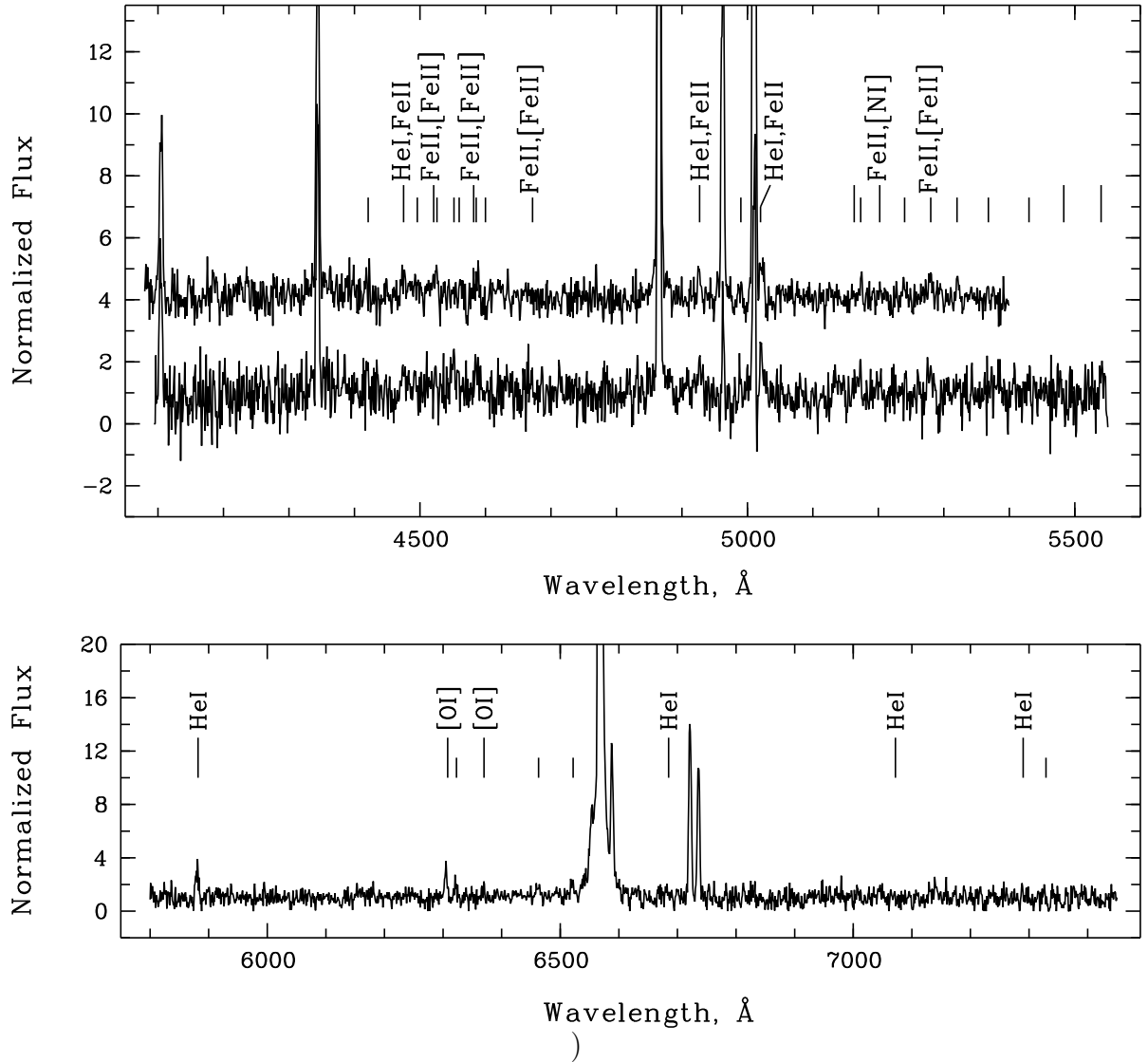


Рисунок 26 — Нормированные спектры J122811.70+440550.9, полученные в 2015 (верхняя панель, нижний спектр, БТА/SCORPIO/VPHG1200G) и 2020 (верхняя панель, верхний спектр, БТА/SCORPIO/VPHG1200B), и в 2014 (нижняя панель, БТА/SCORPIO/VPHG1200R) годах. Неподписанные короткие и длинные штрихи обозначают линии железа Fe II и [Fe II] соответственно. В спектре 2015 года правое крыло линии туманности [O III] было перевычтено.

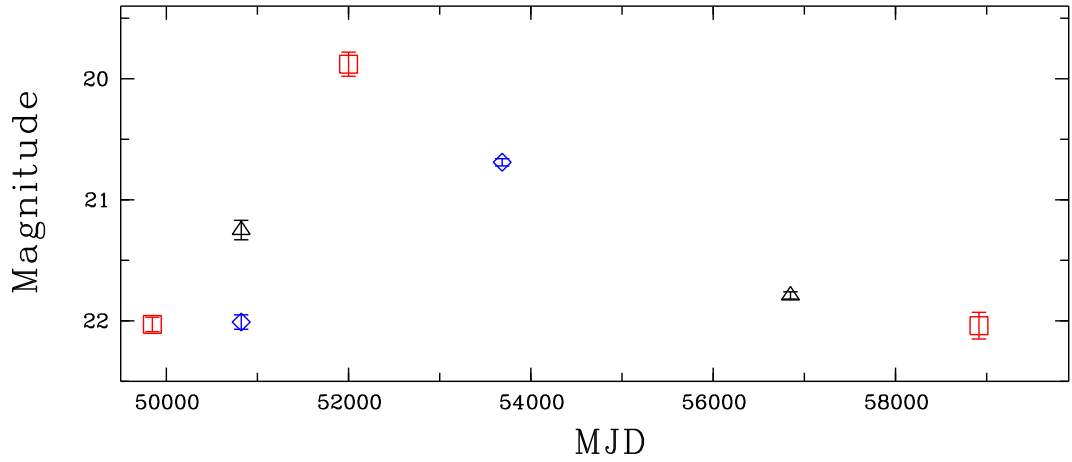


Рисунок 27 — Кривая блеска J122817.83+440630.8 в полосах V (ромбы), U (треугольники) and I (квадраты).

2.8 J122817.83+440630.8

Звезда J122817.83+440630.8 продемонстрировала увеличение блеска $\Delta R = 2.15 \pm 0.13^m$ с 1995 (HST) по 2001 (BOK) годы. К 2020 году (2.5m, SAI MSU) звезда вернулась в прежнее состояние.

Спектр области, содержащей J122817.83+440630.8 (рисунок 28), был получен 11 февраля 2021 года, когда звездная величина объекта составляла $\approx 22^m$. Во время этих наблюдений размер изображения составлял около $2.3''$, и объект был слишком слабым для этих погодных условий, поэтому получен спектр всей области. Полученный спектр ближайшего комплекса H II был использован для оценки межзвездного поглощения $A_V = 0.4 \pm 0.2^m$.

2.9 J122809.72+440514.8

Объект J122809.72+440514.8 показал заметную фотометрическую переменность, максимальное значение которой оказалось в полосе I: $\Delta U = 0.28 \pm 0.24^m$, $\Delta V = 0.48 \pm 0.14^m$, $\Delta I = 0.69 \pm 0.13^m$ с 1997 (HST) по 2020 (Zeiss 1000, SAO RAS; 2.5-m, SAI MSU) годы. Кривая блеска J122809.72+440514.8 приведена на рисунке 29.

Эмиссионные линии He I $\lambda\lambda 4472, 4922$ и Fe II $\lambda\lambda 4400-4700, \lambda\lambda 5100-5400$ в спектре J122809.72+440514.8, полученном в 2015 году, имеют профили типа P Cyg, которые становятся менее явными в спектрах 2017 и 2018 годов и не наблюдается в спектре 2020 года (рисунок 30). Крылья линий водорода H β , H γ заметно

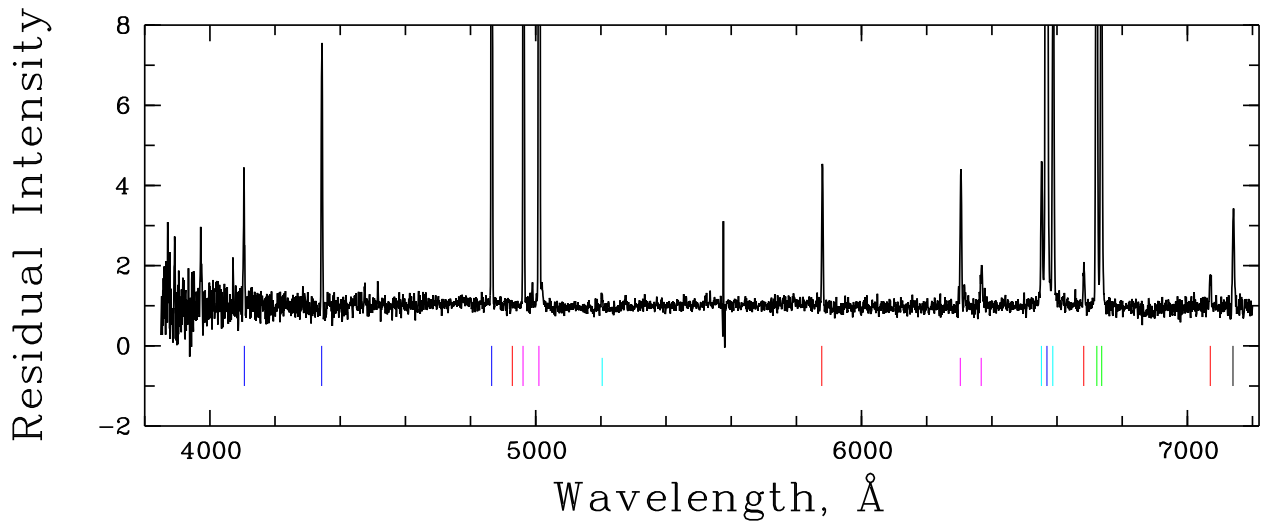


Рисунок 28 — Нормированный спектр H II региона, содержащего J122817.83+440630.8, снятый на БТА/SCORPIO-2/VRHG1200@540. Синими штрихами отмечены линии водорода, красными - линии гелия He I, фиолетовыми - линии [O III], короткими фиолетовыми - линии [O I], зелеными - [S II], голубыми - [N II], короткими голубыми - [N I], черными - линии [Ar III].

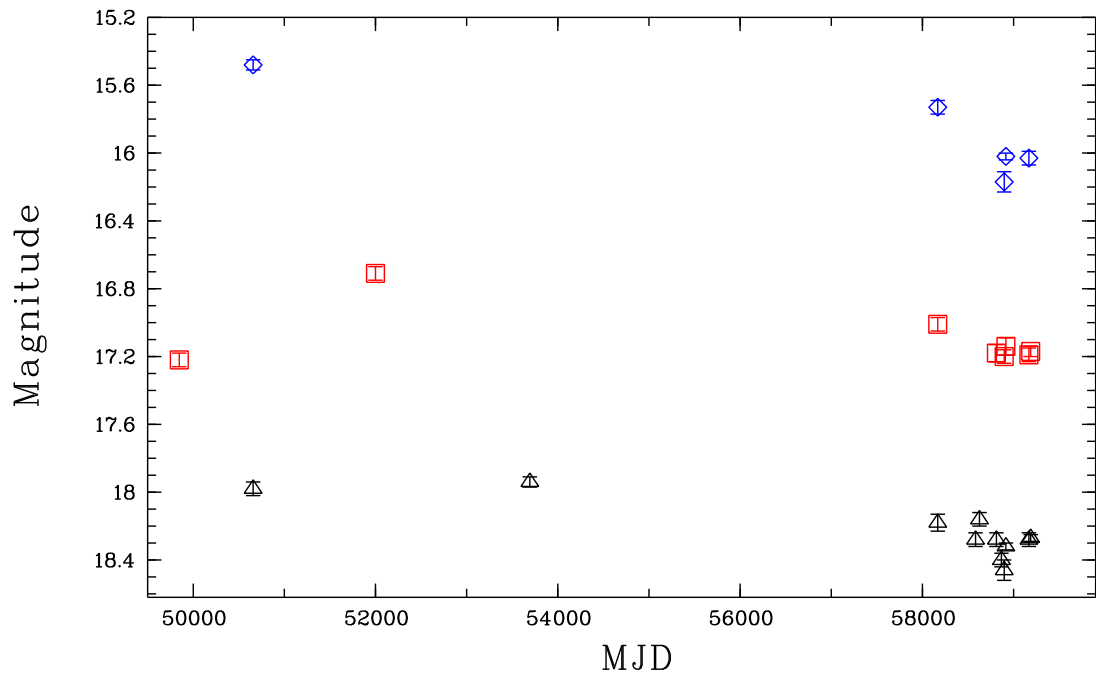


Рисунок 29 — Кривые блеска J122809.72+440514.8 в полосах V (треугольники), R (квадраты) и I (ромбы). Для наглядности кривые блеска в фильтрах R и I смещены на -1^m и -2^m соответственно.

уширились с 2015 по 2020 годы, а линии [Fe II] ($\lambda 5157$) и Fe II ($\lambda 5169$) стали ярче. В то же время наблюдается заметное ослабление других эмиссионных линий железа Fe II и [Fe II] $\lambda\lambda 4500-4700$ и $\lambda\lambda 5200-5400$. Кроме перечисленных линий, в спектрах J122809.72+440514.8 заметны также немногочисленные линии Cr II и Ti II. Также в спектрах наблюдаются линии He I $\lambda 5876$, $\lambda 6678$, но их FWHM соответствуют спектральному разрешению, поэтому эти линии, вероятно, излу-

чаются окружающей туманностью.

Изучение узких компонент водородных линий, излучаемых окружающей туманностью, позволило произвести оценку межзвёздного поглощения $A_V = 0.8 \pm 0.2^m$.

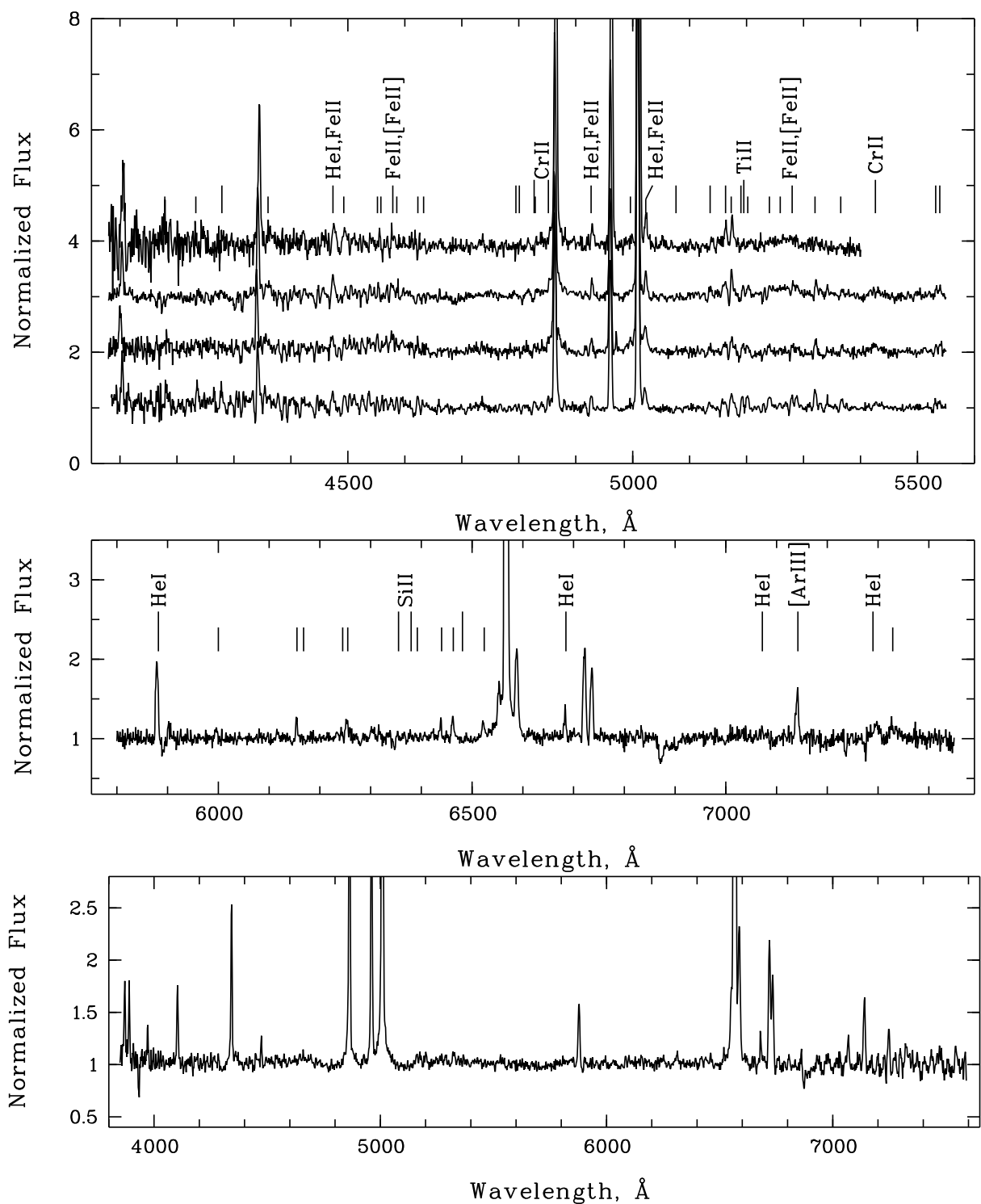


Рисунок 30 — Нормированные спектры J122809.72+440514.8, полученные в 2015, 2017, 2018 и 2020 (верхняя панель, снизу-вверх, БТА/SCORPIO/VPHG1200B(G)), в 2014 (средняя панель, БТА/SCORPIO/VPHG1200R) и 2018 (нижняя панель, гризма БТА/SCORPIO/VPHG550G). Неподписанные короткие и длинные штрихи обозначают линии железа Fe II и [Fe II] соответственно. В красной части спектра, полученного с решеткой VPHG550G, в области 7000 Å заметно влияние интерференции проходящего света (фринги).

Выводы

В данной главе представлено описание наблюдаемых особенностей оптических спектров изучаемых объектов. Все кандидаты показывают широкие компоненты линий водорода, 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. Объект J125057.26+410723.13 показал спектральную переменность с 2015 по 2018 годы по данным БТА/SCORPIO. Изменения в спектре сопровождалось падением блеска $\Delta V \approx 1^m$ за период с 2015 по 2018 годы по данным БТА САО РАН. Кандидат J125055.84+410625.44 также показал некоторые изменения спектральных линий с 2015 по 2018 по данным БТА/SCORPIO, которые сопровождалось понижением блеска $\Delta V \approx 0.2^m$. Спектральную переменность продемонстрировал также и кандидат J122809.72+440514.8 в наблюдениях 2015-2020 годов.

Описан метод оценки межзвёздного поглощения, в котором используется соотношение водородных линий окружающих объекты туманности, а также приведены результаты оценок межзвёздного поглощения с применением данного метода для всех объектов за исключением J125055.84+410625.44.

В этой главе представлены результаты фотометрических измерений изучаемых источников по данным наземных и космических телескопов. Значительное изменение блеска показал кандидат J125057.26+410723.13: переменность составила $\Delta V = 1.18 \pm 0.12^m$ и $\Delta B = 0.90 \pm 0.12^m$ в полосах V и B соответственно с 2005 (HST) по 2018 (2.5-м КГО ГАИШ) годы. Кроме того, наблюдаемый у J125057.26+410723.13 вид зависимости цвета ($B - V$) от изменения блеска в фильтрах B и V характерен для подтверждённых LBV звёзд типа V532 и AF And из галактик M33 и M31 соответственно. Кандидат J125055.84+410625.44 также показал некоторую фотометрическую переменность: максимальное изменение блеска составило $\Delta B = 0.43 \pm 0.07^m$ и $\Delta V = 0.55 \pm 0.08^m$ в полосах B и V с 2014 (БТА) по 2018 (2.5-м телескоп КГО ГАИШ) годы. Кроме того, фотометрия J004703.27-204708.4 выявила значительную переменность его блеска: величина понижения блеска с 2005 (2.2m ESO/MPG) по 2011 (HST) состави-

ла $\Delta B = 0.74 \pm 0.09^m$ и $\Delta V = 0.88 \pm 0.09^m$ в полосах В и V соответственно, после чего объект начал испытывать некоторое незначительное поярчение ($\Delta V = 0.34 \pm 0.10^m$ с 2011 по 2018 годы).

Наиболее заметную фотометрическую переменность показал кандидат J122817.83+440630.8: поярчение в полосе V составило $\Delta R = 2.15 \pm 0.13^m$ с 1995 (HST) по 2001 (ВОК) 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 (HST) по 2020 (Цейсс 1000, САО РАН; 2.5-м телескоп КГО ГАИШ) годы. Остальные изучаемые объекты не показали значительной фотометрической переменности.

3 Определение фундаментальных параметров кандидатов в галактиках NGC 4736, NGC 247, NGC 4449. Спектральная классификация

3.1 Определение фундаментальных параметров

В текущей главе изложены результаты оценки фундаментальных параметров изучаемых в работе звезд, а также представлена их спектральная классификация на основании наблюдаемых проявлений.

3.1.1 J125057.26+410723.13

Температура фотосферы объектов галактики NGC 4736 определялась единым образом по соотношению наблюдаемых эмиссионных линий разных элементов. В спектре J125057.26+410723.13, полученном в 2015 году, наблюдаются яркие бленды He I+Fe II. Наиболее яркой эмиссионной линией железа Fe II в звездных спектрах является линия λ 5169, и на основе её отношения к блендированной линии He I+Fe II $\lambda\lambda$ 5015+5018, которое составляет приблизительно 1.5, сделан вывод о значимом вкладе в интенсивность бленды линии гелия He I. Эмиссионные линии He I достигают наибольшей яркости при температуре фотосферы около 20000 К, тогда как линии Fe II имеют наибольшую интенсивность при температуре ≈ 15000 К. Поэтому температура фотосферы J125057.26+410723.13 была оценена как $T = 18000 \pm 3000$ К. Дополнительная проверка состоятельности полученной оценки была сделана на основе истинного цвета $(B - V)_0$ [126, 127]. Для достижения наибольшей точности измерения цвета использовались данные фотометрии HST (2005). Величина цвета составила $(B - V)_0 = -0.14 \pm 0.04^m$, что соответствует температуре 17000 ± 3000 К. Эта оценка согласуется с температурой по спектральным линиям.

Необходимо отметить, что полученные оценки температуры фотосферы являются очень приблизительными. Наблюдаемые профили и интенсивности линий зависят не только от температуры фотосферы, но и от других параметров,

в том числе и темпа истечения вещества. По этой причине оценка температуры фотосферы объекта, основанная на наблюдаемых эмиссионных линиях, имеет очень низкую точность. Оценка температуры, основанная на определении истинного цвета звезды, также неточна, поскольку она не учитывает истечение вещества в виде звёздного ветра, которое характерно для звёзд типа LBV. Более точная оценка температуры фотосферы объекта возможна лишь с применением не-ЛТР кодов для расчёта моделей протяжённых атмосфер.

Для полученного значения температуры фотосферы была принята болометрическая поправка $BC = -1.45 \pm 0.30^m$ [127]. Из известного значения модуля расстояния (см. выше) и найденных звёздной величины в полосе V по данным HST и оценке покраснения были оценены абсолютная звёздная величина $M_V = -10.2 \pm 0.1^m$ и болометрическая звёздная величина $M_{Bol} = -11.5 \pm 0.5^m$. Болометрическая светимость объекта J125057.26+410723.13 составляет приблизительно $\log(L_{Bol}/L_{\odot}) = 6.5 \pm 0.2$, что сопоставимо со светимостью η Car [128].

3.1.2 J125055.84+410625.44

Линии железа Fe II, в частности Fe II λ 5169, имеют большие эквивалентные ширины, чем наблюдаются в спектре J125055.84+410625.44, что свидетельствует о более низкой температуре фотосферы J125055.84+410625.44. Её величина была оценена как 15000 ± 3000 К, чему соответствует значение болометрической поправки $= -1.0 \pm 0.4^m$ [127]. Туманность вокруг J125055.84+410625.44 не наблюдается, поэтому оценить межзвёздное поглощение по бальмеровскому декременту не удалось. Это не позволило получить истинный цвет звезды $(B - V)_0$ и соответствующую ему температуру. Нижние пределы абсолютной и болометрической звёздных величин составили $M_V < -8.6^m$ и $M_{Bol} < -10.0^m$, что соответствует болометрической светимости $\log(L_{Bol}/L_{\odot}) > 5.9$.

3.1.3 J125103.35+410635.37

Как было отмечено в предыдущей главе, в спектре J125103.35+410635.37 наблюдаются относительно яркие широкие компоненты линий $H\alpha$, $H\beta$ и слабые линии Fe II, при этом линии He I в спектре не видны. На основании наблюдаемых

линий температура фотосферы этого кандидата была оценена как 12000 ± 2000 К.

С помощью фотометрических измерений, выполненных по архивным данным HST (2005), и найденного значения поглощения был определён истинный цвет $(B - V)_0 = 0.04 \pm 0.04^m$ изучаемого объекта, из которого были получены оценки температуры фотосферы 9300 ± 1000 К и соответствующей болометрической поправки BC от 0.05^m до -0.35^m .

Из приведённых выше оценок межзвёздного поглощения и болометрической поправки абсолютная и болометрическая звёздные величины объекта J125103.35+410635.37 оценены как $M_V = -8.2 \pm 0.2^m$ и $M_{Bol} = -8.4 \pm 0.4^m$ соответственно. Полученные оценки температуры фотосферы и покраснения позволили оценить болометрическую светимость объекта $\log(L_{Bol}/L_\odot) \approx 5.3 \pm 0.2$, что соответствует LBV с низкими светимостями.

3.1.4 J004703.27-204708.4

Температура фотосферы объекта оценивалась с помощью фотометрических данных. Для этого было построено спектральное распределение энергии (SED) объекта (рисунок 31) с использованием фотометрии Subaru в фильтрах $UBVR_cI_c$ и ИК-данных, полученных с помощью телескопов HST и Spitzer. Стоит отметить, что инфракрасные данные не одновременны с оптическими. Фотометрические данные, показанные на рисунке, были скорректированы за вклад эмиссионных линий, однако, поскольку спектр не полностью покрывает диапазон фильтра U, вклад линий излучения в поток в этом фильтре может быть недооценен. SED был аппроксимирован моделью абсолютно чёрного тела с учетом межзвёздного поглощения с $R_V = 3.07$ [129]. Возможные изменения межзвёздного поглощения варьировались в пределах ошибок, полученных из спектроскопии $A_V = 0.80 \pm 0.10^m$.

В результате аппроксимации SED были получены оптимальные значения температуры фотосферы объекта $T_{SED} = 18000 \pm 2000$ К и межзвёздного поглощения $A_V \approx 0.9^m$. Из рисунка 31 видно, что спектральное распределение энергии J004703.27-204708.4 имеет значительный избыток излучения в ближ-

нем ИК-диапазоне, который, вероятно, вызван присутствием околозвездной газопылевой оболочки. Для оценки температуры этой оболочки в аппроксимацию SED был добавлен дополнительный чернотельный компонент, в результате чего температура вероятной пылевой компоненты была оценена как $T_{dust} \approx 1400$ К (рисунок 31).

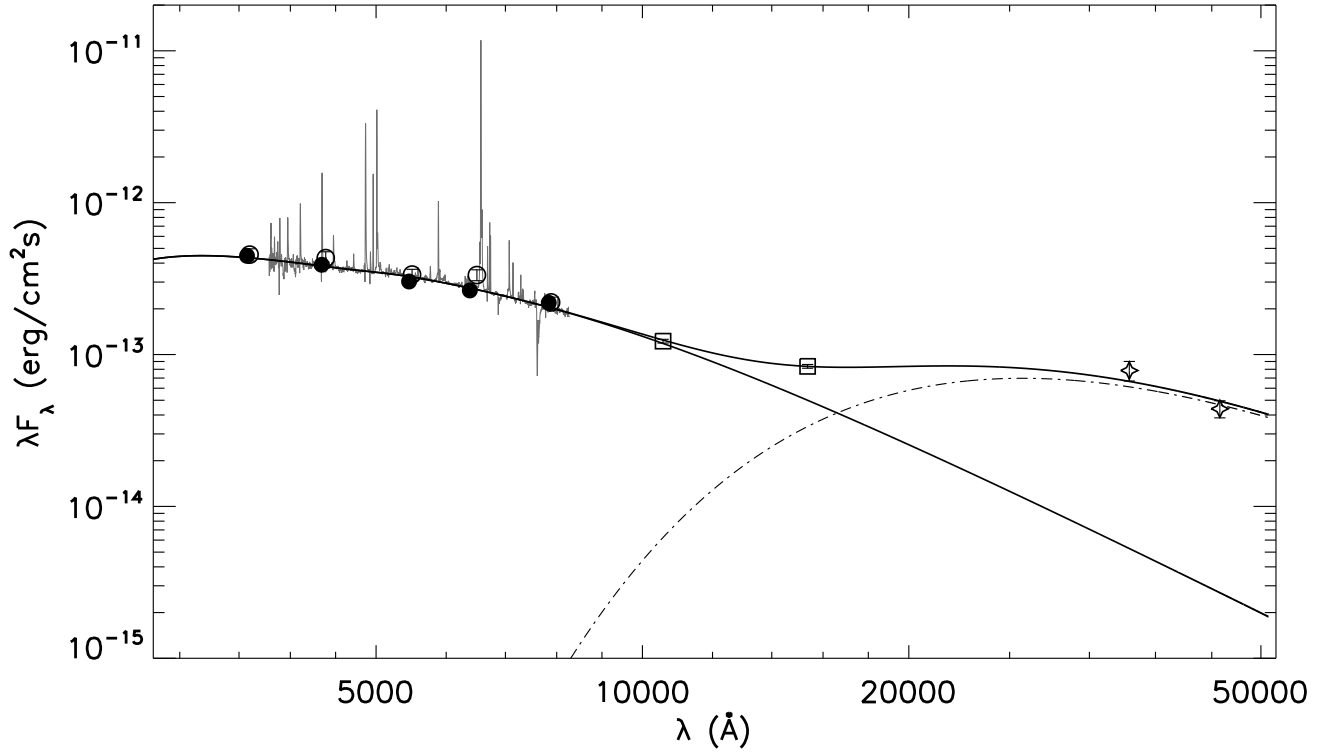


Рисунок 31 — Спектральное распределение энергии J004703.27-204708.4. Кружками обозначена фотометрия $UBVR_cI_c$ Subaru (2016), заполненные кружки обозначают потоки, скорректированные за вклад ярких эмиссионных линий, незаполненные кружки - исходные потоки. Квадраты и крестики обозначают ИК-фотометрию по данным HST/WFC3/IR в полосах F105W и F160W (2014) и Spitzer/IRAC в полосах 3.6 мкм и 4.5 мкм (2012) соответственно. Наблюдаемые спектры показаны серым цветом. SED аппроксимирован двумя чернотельными функциями (сплошные линии), описывающими излучение фотосферы звезды (пунктирная линия) и ИК-избыток (штрихпунктирная линия), возникающий, вероятно, из пылевой оболочки вокруг звезды. Наиболее подходящими параметрами модели являются $T_{SED} = 18000 \pm 2000$ К, $A_V \approx 0.9^m$, $T_{dust} \approx 1400$ К.

На основании оценки температуры фотосферы из аппроксимации SED $T_{SED} = 18000 \pm 2000$ К и оценки межзвёздного поглощения $A_V = 0.80 \pm 0.10^m$, полученных по наблюдаемому спектру туманности, были получены оценки абсолютной и болометрической звёздных величин как $M_V = -9.08 \pm 0.15^m$ и $M_{bol} = -10.5_{-0.4}^{+0.5}$ mag, что соответствует болометрической светимости $\log(L_{Bol}/L_{\odot}) = 6.11_{-0.16}^{+0.20}$.

3.1.5 J004702.18-204739.93

Спектральное распределение энергии J004702.18-204739.93 (рисунок 32), как и в случае J004703.27-204708.4, было построено по фотометрическим данным телескопа Subaru совместно с инфракрасными данными HST и Spitzer. Звезда не показала заметных изменений блеска с 2016 по 2018 годы ($\Delta R = 0.1^m$), поэтому для учёта вклада эмиссионных линий в суммарный поток от объекта, измеренный по данным с телескопа Subaru (2016), был использован спектр, полученный на телескопе SALT в 2018 году. SED был также аппроксимирован функцией Планка с оптимальными значениями температуры $T_{SED} = 15000 \pm 2000$ К и поглощения $A_V \approx 0.7^m$. Как и в случае предыдущего объекта, SED J004702.18-204739.93 также показывает избыток излучения в ближнем ИК диапазоне, который может быть связан с газопылевой оболочкой, температура которой оценена как $T_{dust} \approx 1300$ К путём добавления в модель спектрального распределения энергии второй чернотельной функции.

На основании оценки температуры фотосферы $T_{SED} = 15000 \pm 2000$ К и значения межзвёздного поглощения $A_V = 0.90 \pm 0.20^m$, оцененного по водородным линиям туманности, абсолютные и болометрические звёздные величины составили $M_V = -9.66 \pm 0.23^m$ и $M_{bol} = -10.8_{-0.6}^{+0.5}$ mag, что соответствует болометрической светимости $\log(L_{Bol}/L_{\odot}) = 6.24_{-0.25}^{+0.20}$.

3.1.6 J122810.94+440540.6

Температура фотосферы объекта получена из аппроксимации наблюдаемого SED, который был построен по фотометрическим данным в исходных фильтрах HST 1998 года (рисунок 33,а). Данные камер WFC3/IR (фильтры F110W и F160W, 2019 год), ACS/HRC (фильтры F330W, F435W, F550M, F658N, F814W, 2006 год) и WFC3/UVIS (полосы F275W и F336W, 2014 год) были нанесены на рисунок в демонстрационных целях, но при аппроксимации SED не учитывались.

Как видно из рисунка 33,а спектральное распределение энергии J122810.94+440540.6 демонстрирует спад в диапазоне фильтра F275W, который, вероятно, связанный с сильным поглощением излучения металлами.

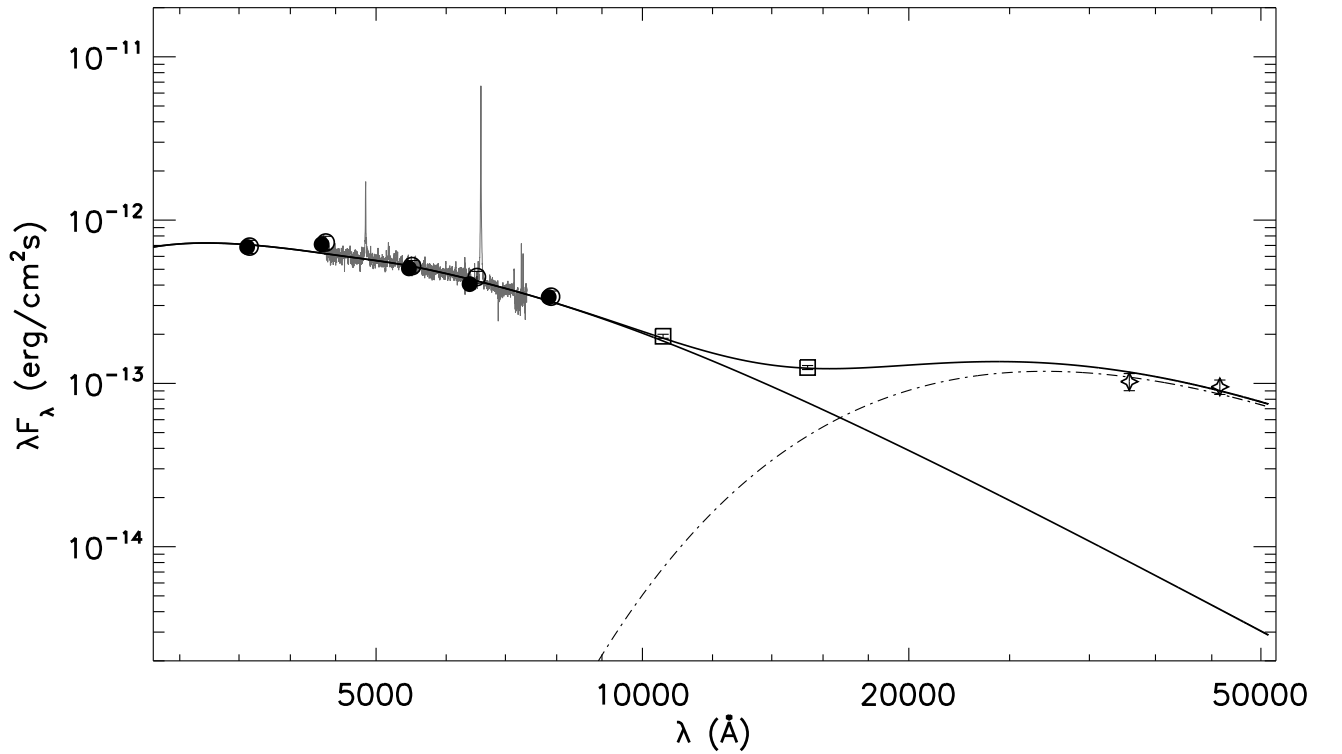


Рисунок 32 — Спектральное распределение энергии J004702.18-204739.93. Кружками обозначена фотометрия $UBVR_cI_c$ Subaru (2016), заполненные кружки обозначают потоки, скорректированные за вклад ярких эмиссионных линий, незаполненные кружки - исходные потоки. Квадраты и крестики обозначают ИК-фотометрию по данным HST/WFC3/IR в полосах F105W и F160W (2014) и Spitzer/IRAC в полосах 3.6 мкм и 4.5 мкм (2012) соответственно. Наблюдаемые спектры показаны серым цветом. SED аппроксимирован двумя чернотельными функциями (сплошные линии), описывающими излучение фотосферы звезды (пунктирная линия) и ИК-избыток (штрихпунктирная линия), возникающий, вероятно, из пылевой оболочки вокруг звезды. Наиболее подходящими параметрами модели являются $T = 15000 \pm 2000$ К, $A_V \approx 0.7^m$, $T_{dust} \approx 1300$ К.

SED был аппроксимирован функцией Планка с учётом межзвёздного поглощения с $R_V = 3.07$. Межзвёздное поглощение при аппроксимации ограничивалось диапазоном значений $A_V = 0.2 \pm 0.2^m$, определенным на основе спектроскопии окружающей туманности. Из аппроксимации были получены оптимальные значения температуры фотосферы звезды $T_{SED} = 10000 \pm 500$ К при значении $A_V \approx 0.4^m$, а соответствующие значения болометрической звёздной величины и светимости составили $M_{Bol} = -9.6 \pm 0.23^m$ и $\log(L_{Bol}/L_{\odot}) = 5.76 \pm 0.09$. Стоит отметить присутствие явного избытка излучения в ближнем ИК диапазоне (фильтры F110W, F160W), который, вероятно, связан со свободно-свободным излучением ветра и/или присутствием околозвёздной тёплой пыли. Для выяснения природы избытка необходимы наблюдения с высоким пространственным разрешением в более далёком ИК диапазоне.

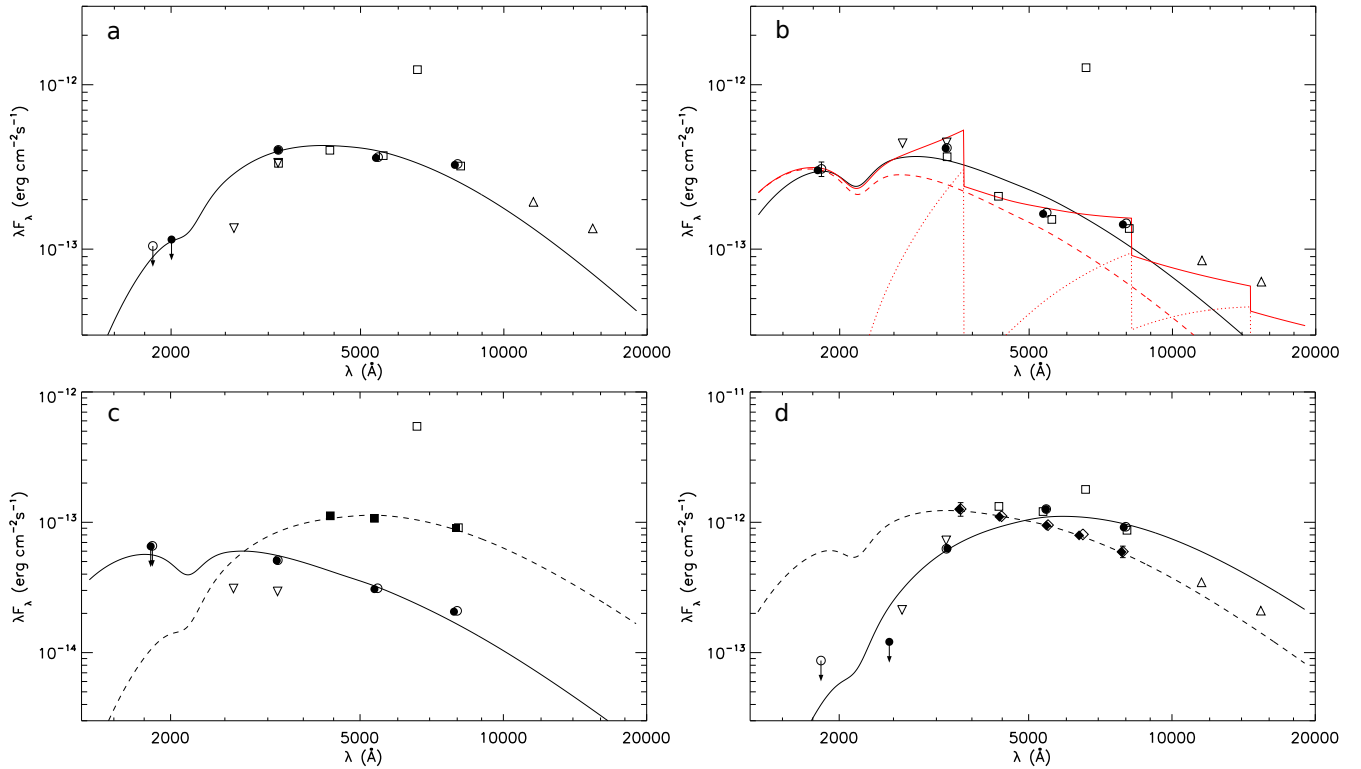


Рисунок 33 — Спектральные распределения энергии исследуемых объектов. Черные сплошная и пунктирная линии обозначают чернотельную модель, наилучшим образом описывающую наблюдаемое распределение энергии. Незаполненные и заполненные символы соответствуют данным, приведённым к опорной длине волны λ_{pivot} фильтров HST, и данным, скорректированным за наклон SED при аппроксимации чернотельной моделью (приведённая длина волны для каждого конкретного фильтра рассчитывается по формуле $\lambda_{pivot} = \sqrt{(\int T(\lambda)d\lambda)/(T(\lambda)d\lambda/\lambda^2)}$, где $T(\lambda)$ - функция пропускания фильтра). На всех рисунках треугольниками вершиной вверх отмечены ИК-данные камеры HST/WFC3/IR (2019), а треугольниками вершиной вниз обозначены УФ-данные камеры HST/WFC3/UVIS (2014). а) J122810.94+440540.6. Квадратами отмечены данные камеры HST/ACS/HRC (2006). Кружками обозначена фотометрия HST/WFPC2 (1998). б) J122811.70+440550.9. Квадратами отмечены данные камеры HST/ACS/HRC (2006). Кружками обозначена фотометрия HST/WFPC2 (1998). Сплошной красной линией обозначена композиционная модель, включающая вклад излучения черного тела (красная пунктирная линия) и излучений f-f и f-b (красная точечная линия; подробности см. текст). в) J122817.83+440630.8. Кружками представлена фотометрия по данным камеры HST/WFPC2 (1998). Квадратами обозначена фотометрия HST/ACS/WFC (2005). г) J122809.72+440514.8. Кружки обозначают фотометрию HST/WFPC2 (1997). Квадратами обозначены данные, полученные с помощью камеры HST/ACS/WFC (2005). Ромбами отмечены данные 2.5-метрового телескопа ГАИШ МГУ (2020).

3.1.7 J122811.70+440550.9

Температура фотосферы этого объекта также оценивалась из SED. Как и в случае с предыдущим объектом, SED был построен по данным HST за 1998 год и аппроксимирован моделью черного тела с ограничением межзвёздного поглощения A_V в пределах неопределенностей 0.3 ± 0.2^m , полученных по водородным линиям туманностей. В результате фитирования спектрального распределения энергии получена оценка температуры фотосферы объекта $T_{\text{eff}} = 17000 \pm 7000 K$ при $A_V \approx 0.5$, а также оценки болометрической звездной величины и светимости $M_{\text{Bol}} = -10.00 \pm 2.00^m$ и $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 5.92 \pm 0.80$.

Необходимо отметить, что модель, учитывающая исключительно чернотельное излучение, даёт плохое согласие с наблюдаемыми потоками (черная сплошная линия на рис. 33b), и показывает сильное расхождение в диапазонах длин волн, соответствующих границам серий Бальмера и Пашена. Эта ситуация аналогична наблюдаемой у В[e]-сверхгиганта J004415.00 в галактике M31, исследованного в работе [130]. Изучая SED этого объекта, авторы обнаружили значительный вклад свободно-свободного (f-f) и свободно связанного (f-b) излучения, что указывает на присутствие ионизированной околозвездной оболочки, характерной для В[e]-сверхгигантов [131, 132]. Следуя методам, описанным в статье [130], наблюдаемый SED J122811.70+440550.9 был аппроксимирован моделью черного тела с дополнительными спектральными компонентами, учитывающими как f-f, так и f-b излучение ¹² с использованием пакета CHIANTI [133, 134]. При аппроксимации рассматривался случай изотермической полностью водородной плазмы с электронной температурой $T_e = 10000 K$ [81]. Значение межзвёздного поглощения было ограничено указанными выше неопределенностями. В результате фитирования спектрального распределения были получены оценки температуры фотосферы $T_{\text{eff}} = 20800 \pm 4500 K$, меры эмиссии $EM = 1.47 \times 10^{39} \pm 4.37 \times 10^{38} \text{ cm}^{-5}$ при значении $A_V \approx 0.5^m$, а также оценки болометрической звездной величины и светимости $M_{\text{Bol}} = -9.90 \pm 1.09^m$ и $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 5.88 \pm 0.44$ ¹³.

¹²При применении этой сложной модели, в дополнение к одновременным точкам данных 1998 г. использовалась фотометрия в фильтрах WFC3/UVIS/F275W и ACS/HRC/F435W. Добавление дополнительных точек не противоречит наблюдаемому SED за 1998 год, поскольку объект показал низкую фотометрическую переменность, и необходимо для достижения большей точности оценки параметров.

¹³включая только компонент чернотельного излучения

Результаты аппроксимации SED трёхкомпонентной моделью показаны на рисунке 33b красными линиями: пунктирной линией обозначено излучение черного тела, точечной линией обозначены излучения f–f и f–b, а сплошной красной линией представляет суммарный модельный спектр. Сплошная черная линия представляет результат применения простой модели черного тела. В целях демонстрации ИК-данные (WFC3/IR/F110W,F160W, 2019 год) и оптические данные (ACS/HRC/F330W,F550M,F658N,F814W, 2006; WFC3/UVIS/F336W, 2014) также были нанесены на график, однако, при фитировании SED они не использовались.

3.1.8 J122817.83+440630.8

J122817.83+440630.8 показал сильную фотометрическую переменность, как уже отмечалось в предыдущей главе. В соответствии с этим форма спектрального распределения энергии объекта также менялась. SED были построены по данным HST 1998 и 2005 годов (рисунок 33d). В предположении характера переменности блеска типа S Dor (постоянство болометрической светимости и межзвёздного поглощения) выполнена совместная аппроксимация спектральных распределений энергии чернотельными функциями. Как и в предыдущих случаях вариации межзвёздного поглощения ограничивались диапазоном $A_V = 0.4 \pm 0.2^m$, полученным из спектроскопии окружающей туманности. В результате аппроксимации получены оценки температуры фотосферы объекта $T_{\text{SED}} = 19000 \pm 1200$ K (1998 год) и $T_{\text{SED}} = 9000 \pm 600$ K (2005) для значения поглощения $A_V \approx 0.6^m$, что даёт оценку болометрической звёздной величины $M_{\text{Bol}} = -8.30 \pm 0.38^m$ и соответствующую болометрическую светимость $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 5.12 \pm 0.15$.

На рисунок 33d также нанесены данные 2014 года в фильтрах F275W и F336W камеры WFC3/UVIS. Они лежат ниже обеих кривых, описывающих спектральные распределения энергии звезды в 1998 и 2005 году. По-видимому, это связано с тем, что в 2014 году звезда находилась в состоянии, отличном от состояний 1998 и 2005 годов.

3.1.9 J122809.72+440514.8

Фотометрический мониторинг звезды с помощью наземных телескопов, проведенный в 2018–2021 годах, выявил наиболее заметные изменения цвета и блеска звезды. Более ранние данные (HST) показывают менее явную фотометрическую переменность. В то же время данные HST до 2014 года включительно демонстрируют явный спад интенсивности в диапазоне длин волн 3000–4000 Å (рисунок 33с), что является, по-видимому, проявлением глубокого Бальмеровского скачка. В то же время, спектральное распределение энергии, построенное по наблюдениям 2020 года в широком диапазоне длин волн (от U до I_c), не показывает явных признаков наличия бальмеровского скачка.

В случае J122809.72+440514.8 совместная аппроксимация двух крайних состояний звезды (по данным HST за 1997 год и 2.5-м КГО за 2020 год) чернотельной функцией и постоянными значениями A_V и L_{bol} не дала удовлетворительных результатов. Причиной этого могут быть вариации в величине межзвёздного поглощения или же в величине болометрической светимости. В литературе известны примеры обоих случаев. Изменение A_V наблюдалось у η Car, что было связано с конденсацией пыли в оболочке, выброшенной во время Великой вспышки [135]. Однако, в литературе не обнаружены примеры изменения поглощения в среде, окружающей LBV звезду с переменностью типа S Dor. При этом изменения болометрической светимости наблюдались у нескольких подтвержденных LBV в течение цикла переменности S Dor. Как уже отмечалось во введении, примером может служить звезда AG Car, болометрическая светимость которой уменьшилась в 1.5 раза во время максимума яркости в полосе V [70]. Подобное поведение у самой звезды S Dor было отмечено в работе [34]. Авторы также показали, что болометрическая светимость LBV может изменяться в пределах 0.2 dex, что может быть связано с потерями энергии на расширение оболочки при изменении яркости звезды от минимума к максимуму.

В соответствии с вышеизложенным спектральные распределения энергии в двух крайних состояниях звезды были аппроксимированы с ограниченным в пределах неопределённостей значением межзвёздного поглощения $A_V =$

0.8 ± 0.2^m и болометрической светимостью, выбранной в качестве свободного параметра. В результате аппроксимации получены следующие параметры: $T_{\text{eff}} = 7600 \pm 300$ K, $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.20 \pm 0.11$ ($M_{\text{Bol}} = -10.70 \pm 0.27^m$) для «холодного» состояния (1997 год) и $T_{\text{eff}} = 13500 \pm 4300$, $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.44 \pm 0.64$ ($M_{\text{Bol}} = -11.30 \pm 1.60^m$) для «горячего» состояния (2020) при значении поглощения $A_V = 0.6^m$. Спектральные распределения энергии и соответствующие модели показаны на рисунке 33d.

Разница между двумя полученными значениями L_{Bol} находится близко к значению 0.2 dex, о котором говорилось выше. Однако вполне вероятно, что полученное изменение светимости является мнимым и связанным с недооценкой температуры фотосферы в холодном состоянии из-за наличия бальмеровского скачка. Чтобы проверить это предположение, использовались не-ЛТР модели CMFGEN [100], которые способны дать более точные оценки фундаментальных параметров звезды в условиях сильного истечения газа в виде ветра.

Модель CMFGEN. Фотометрические данные в фильтрах F275W и F336W камеры HST/WFC3/UVIS, полученные в 2014 году, хорошо согласуются с данными камеры HST/WFPC2 за 1997 год в УФ-диапазоне, что указывает на отсутствие существенной разницы в состояниях звезды между этими датами наблюдений. Наблюдаемые особенности в спектре звезды, полученном в 2015 году, согласуются с относительно низкими температурами истекающего газа, что может соответствовать холодному состоянию звезды, наблюдавшемуся по крайней мере в 1997 и 2014 годах. По этой причине этот спектр был использован для моделирования холодного состояния звезды с помощью кода CMFGEN. Для получения оценок светимости звезды дополнительно были использованы фотометрические данные за 1997 и 2014 годы.

Код CMFGEN решает уравнение переноса излучения наряду с уравнениями статистического равновесия и уравнением лучистого равновесия при сферической геометрии для расширяющихся атмосфер звёзд типа WR, LBV и O-звёзд [136]. Закон скорости [137] характеризуется эффективной высотой h во внутренней изотермической атмосфере, а в ветре он принимает вид β -закона [138]:

$$V(r) = \frac{V_0 - (V_\infty - V_0)(1 - R_*/r)^\beta}{1 + (V_0/V_*)\exp[(R_* - r)/h]} \quad (1)$$

где R_* - радиус звезды на оптической толщине Росселанда $\tau \gtrsim 20$;

V_∞ - терминальная скорость (скорость ветра на бесконечности);

V_* - скорость в точке R_* ;

V_0 - скорость перехода между гидростатической структурой и ветром.

Код CMFGEN позволяет учитывать микронеоднородности в ветре (клампинг), используя закон изменения фактора заполнения, задаваемый формулой 2 [139]:

$$f(r) = f_0 + (1 - f_0)\exp\left(-\frac{V(r)}{V_{cl}}\right) \quad (2)$$

где f_0 - коэффициент заполнения на расстоянии, соответствующем скорости ветра V_{cl} , с которой начинают проявляться микронеоднородности. Объемным фактором заполнения называется отношение объема, заполненного микронеоднородностями, к общему объему ветра. Он определяется как отношение средней плотности ветра к плотности внутри неоднородностей. Неоднородности в ветре снижают темп потери массы однородной модели в $1/\sqrt{f}$ раз.

Модели атмосфер, рассчитанные в помощью CMFGEN, задаются набором параметров, включающим в себя фундаментальные параметры звезды (светимость, эффективная температура, радиус), параметры ветра (темп потери массы, терминальная скорость, β), а также турбулентную скорость и фактор заполнения. Терминальная скорость V_∞ может быть оценена по спектральным линиям, которые образуются в отдалённых частях ветра, в то время как остальные параметры определяются из моделирования.

В качестве первого приближения для моделирования спектра J122809.72+440514.8 использовались модели из сеток моделей CMFGEN, рассчитанных для протяженных атмосфер атмосферы из работы (Костенков и др. 2021, в стадии подготовки).

Предполагалось, что распределение скоростей в звездном ветре подчиняется простому скоростному закону с $\beta = 1$ [138]. Такое значение β обеспечива-

Таблица 10 — Основные параметры модели спектра J122809.72+440514.8 и содержания химических элементов (X).

L_*, L_\odot	2.58×10^6
$\dot{M}, M_\odot \text{ yr}^{-1}$	5.2×10^{-3}
$R_{2/3}^*, R_\odot$	620
R_*^*, R_\odot	410
$T_{\text{eff}}^*, \text{K}$	9300
T_*^*, K	11360
β	1.0
$V_\infty, \text{km s}^{-1}$	300
f	1
H, %	20
X_{C}/X_\odot	0.2
X_{N}/X_\odot	5.4
X_{Si}/X_\odot	0.5
X_{Fe}/X_\odot	0.5

Заметки. * $R_{2/3}$ и T_{eff} - радиус и температура на $\tau = 2/3$, T_* - температура на гидростатическом радиусе R_* ($\tau \gtrsim 20$)

ет очень быстрый рост скорости газа у поверхности звезды, который приводит к компактной фотосфере, что следует из наличия бальмеровского скачка поглощения, наблюдаемого в спектральном распределении звезды. Отсутствие запрещенных линий, образующихся в далеких областях ветра (например, [N II] $\lambda 5755$), не позволяет точно оценить конечную скорость ветра, поэтому ее значение было принято равным 300 km s^{-1} , что позволило достаточно точно воспроизвести профили P Cуг линий железа при заданном законе скорости. Из-за низкого отношения сигнал-шум в спектре невозможно определить имеются ли у водородных линий крылья, связанные с рассеянием излучения, которые являются указанием на степень однородности вещества ветра. По этой причине структура ветра предполагалась однородной (фактор заполнения $f = 1$). Содержание металлов предполагалось равным металличности галактики NGC 4449 $Z = 0.5Z_\odot$ [140], за исключением содержания азота и углерода, которое было изменено в соответствии со значениями, наблюдаемыми в детально изученных LBV звёздах (таблица 10). Содержание водорода определялось итеративно следующим образом: из линии $\text{H}\beta$ вычиталась ее звездная компонента, полученная из модели текущей итерации, при этом отношение [O III] $\lambda 5007$ к «остатку $\text{H}\beta$ » должно было быть равным соотношению этих линий в спектре чистой туманности, экстрагированной вблизи объекта.

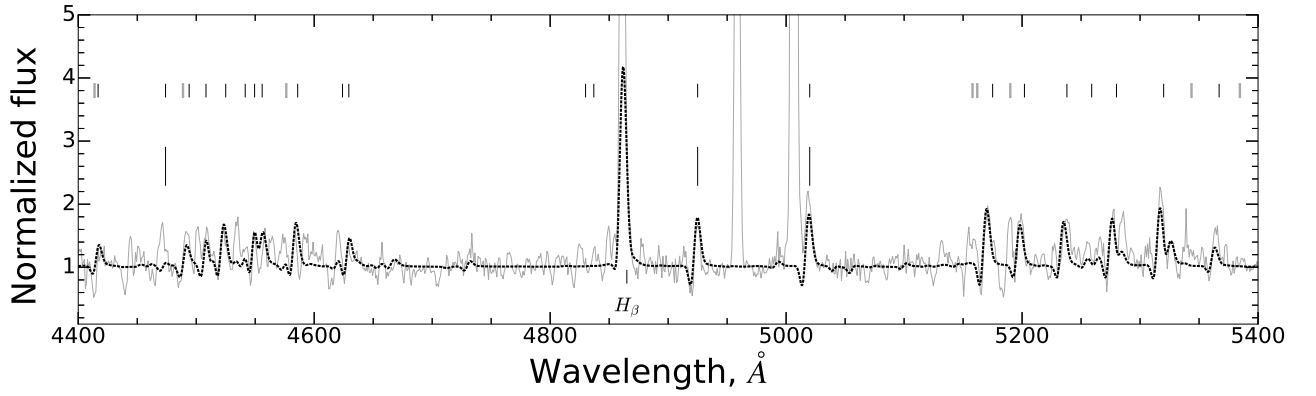


Рисунок 34 — Нормированный спектр J122809.72+440514.8, полученный в 2015 году (серая линия) и наилучшая модель спектра, рассчитанная с помощью кода SMFGEN (чёрная линия). Длинные черные штрихи обозначают линии He I; линии Fe II и [Fe II] отмечены короткими чёрными и толстыми серыми штрихами, соответственно.

Наилучшее соответствие наблюдаемого и модельного спектров достигнуто при значении темпа потери массы $\dot{M} = 5.2 \times 10^{-3} M_{\odot} yr^{-1}$ и температуре $T_{*} = 11360$ К на гидростатическом радиусе звезды $R_{*} \approx 410 R_{\odot}$ (рисунок 34). Основные параметры модели представлены в таблице 10. Чрезвычайно мощное истечение вещества в этой модели увеличивает непрозрачность на больших расстояниях от R_{*} и значительно снижает температуру на радиусе фотосферы, $T_{\text{eff}} = 9300$ К. Однако данная оценка эффективной температуры все же значительно превышает значение, полученное из аппроксимации спектрального распределения энергии моделью абсолютно черного тела ($T_{\text{eff}} = 7600 \pm 300$ К).

Точность оценок темпа потери массы ограничивается неопределенностью вклада излучения туманности в линии водорода, наблюдаемые в спектре объекта. Эта неопределенность может быть уменьшена путем проведения дальнейших наблюдений с более высоким спектральным разрешением. Точность же оценок температуры определяется несколькими факторами. Прежде всего, в спектре объекта не наблюдаются линии кремния Si II, которые чувствительны к изменению состояния ионизации вещества в ветре. Поэтому верхний предел температуры фотосферы в модели был ограничен значением ~ 11000 К. Нижний предел эффективной температуры (~ 9000 К) оценивался на основе силы абсорбционных компонент линий H β и Fe II. Понижение температуры фотосферы приводит к увеличению количества нейтрального водорода, и, следовательно, к увеличению абсорбционного компонента линии H β . Помимо этого, еще

одним следствием понижения температуры ниже ≈ 9000 К является заметное ослабление линий Fe II. Вместе с тем, увеличение темпа потери массы способно компенсировать ослабление интенсивности линий ионизованного железа, однако результирующее увеличение плотности ветра также усиливает абсорбционные компоненты этих линий. Поскольку в спектре объекта не наблюдаются сильные линии поглощения, предполагалось, что нижняя оценка температуры фотосферы составляет 9000 К.

Болометрическая светимость определялась путем аппроксимации наблюдаемого спектрального распределения энергии (1997 год) полученным модельным спектром с учётом межзвездного поглощения, причем величина A_V оставалась свободным параметром. Наилучшее согласие между наблюдаемым распределением энергии и моделью было получено при значении $A_V = 1.05 \pm 0.07^m$, что соответствует значению, полученному из наблюдений, но заметно выше оценки, основанной на аппроксимации моделью абсолютно чёрного тела (0.6^m). Оценка болометрической светимости составила $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.41 \pm 0.03$. Модель и наблюдаемое спектральное распределение энергии представлены на рисунке 35, на котором данные наблюдений показаны черным, а модельные потоки - серым. Также на рисунке показаны наблюдаемые потоки по данным камер ACS/WFC (2005 год) и WFC3/UVIS (2014 год). Очевидное совпадение наблюдаемого распределения энергии с модельным спектром подтверждает исходное предположение о том, что звезда находилась приблизительно в одном и том же состоянии в 1997, 2005 и 2014-2015 годах.

Спектр J122809.72+440514.8, полученный в 2015 году, показывает сходство со спектрами многих подтвержденных LBV звёзд в холодном состоянии (например, HR Car, [141]; AG Car, [142]; Var C [143]), однако, наибольшее сходство наблюдается со спектром η Car 2001 года (рис. 7 в [144]). Авторы этой работы выполнили количественный анализ спектра η Car и его моделирование с помощью кода CMFGEN.

Результаты моделирования спектра J122809.72+440514.8 показали чрезвычайно высокие значения темпа потери массы $\dot{M} = 5.2 \times 10^{-3} M_{\odot}/\text{yr}$, что выше значения этой величины у η Car ($\dot{M} = 2.4 \times 10^{-3} M_{\odot}/\text{yr}$, [144]). Тем не ме-

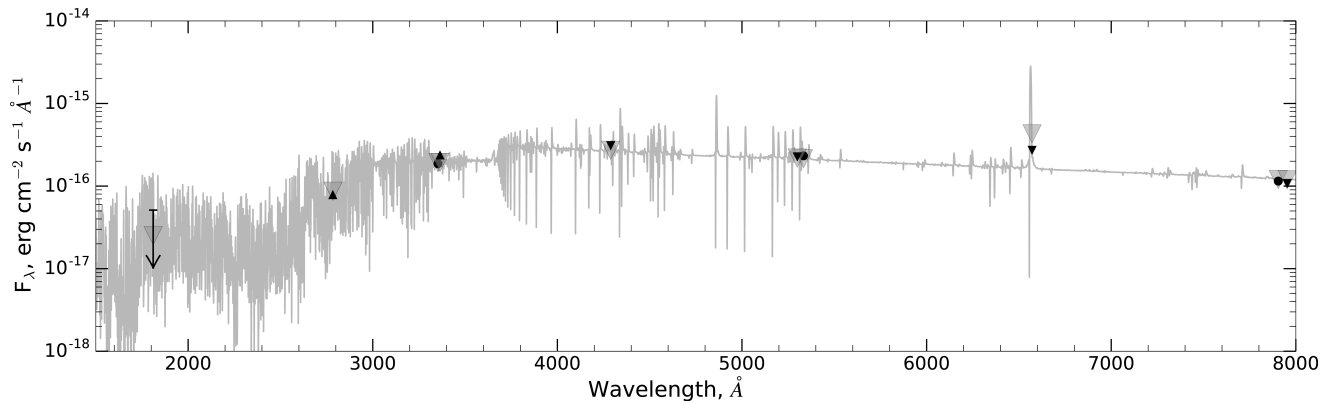


Рисунок 35 — Наилучшая модель спектра J122809.72+440514.8, полученного в 2015 году (серая линия). Модельные потоки в фильтрах F170W, F336W, F555W и F814W отмечены серыми треугольниками. Черные кружки обозначают фотометрические данные HST/WFPC2 (1997 год), черные треугольники вершиной вниз - данные HST/ACS/WFC (2005 год), черные треугольники вершиной вверх - WFC3/UVIS data (2014 год).

нее, следует отметить, что достоверность полученного значения темпа потери массы J122809.72+440514.8 оценить сложно, поскольку существует вырождение между темпом потерей массы и соотношением содержаний гелия и водорода при низких температурах: увеличение содержания водорода может быть скомпенсировано соответствующим увеличением темпа потери массы \dot{M} . Такая же трудность возникла при моделировании спектра η Car [145]. Избежать это вырождение не удаётся и при использовании других спектральных линий. Например, уменьшение темпа потери массы может привести к уменьшению интенсивностей линий Fe II в модели, но в то же время уменьшение интенсивностей этих линий может быть скомпенсировано увеличением содержания железа Fe II, которое точно неизвестно из-за неопределенности металличности звезды. Последние три года звезда демонстрирует увеличение своей температуры, поэтому её дальнейшие спектральные наблюдения с последующим моделированием спектра, вероятно, смогут решить указанную проблему.

Также примечательно, что η Car имеет значительно большую фотосферу ($\approx 860 R_{\odot}$), чем J122809.72+440514.8 ($\approx 620 R_{\odot}$) при почти одинаковой температуре и более низком темпе потери массы. Вероятно это связано со следующими факторами: во-первых, из-за значительного различия выбранных значений фактора заполнения, а во-вторых, из-за использования в работе [144] более сложного скоростного закона, который был выбран в соответствии с доступными спектральными данными в очень широком диапазоне длин волн

(от ультрафиолетового до инфракрасного). В случае же J122809.72+440514.8 была применена простейшая модель β -закона. Менее выраженный бальмеровский скачок указывает на более протяжённую фотосферу η Car по сравнению с J122809.72+440514.8.

В целом, по итогам выполненного моделирования оптического спектра J122809.72+440514.8 в холодном состоянии, можно отметить, что низкое качество имеющихся спектральных данных, большая неопределённость вклада излучения туманности, а также отсутствие ИК- и УФ-спектров не позволяют должным образом оценить такие важные параметры, как β , терминальная скорость, содержание водорода, что, в свою очередь, снижает точность оценок темпа потери массы и температуры фотосферы. Тем не менее, полученная модель способна воспроизвести многие наблюдаемые особенности спектра.

3.2 Диаграмма Герцшпрунга-Рессела для обнаруженных LBV-кандидатов

Кандидаты в галактике NGC 4736. На рисунке 36 представлена диаграмма "температура-светимость" для трёх LBV-кандидатов из галактики NGC 4736. Вероятные диапазоны температур фотосферы и светимостей объектов J125057.26+410723.13 и J125103.35+410635.37 обозначены серыми фигурами. Для объекта J125055.84+410625.44 обозначен нижний предел светимости. В демонстративных целях на диаграмму также нанесены эволюционные треки для массивных звёзд из работы [146] для значения металличности $Z = 0.01$ для галактики NGC 4736 [147].

Сравнение положений объектов на диаграмме "температура-светимость" с эволюционными треками даёт возможность получить приблизительную оценку начальных масс кандидатов. В результате сравнения начальная масса объекта J125057.26+410723.13 оценена как $\sim 130 M_{\odot}$, тогда как для кандидатов J125055.84+410625.44 и J125103.35+410635.37 получены оценки массы около ~ 50 и чуть более $20 M_{\odot}$ соответственно. Во всех случаях неопределённость оценок весьма высока, и составляет не менее 25% величины.

На основании оценок начальных масс объектов был сделан вывод, что

LBV звезда J125057.26+410723.13 и LBV-кандидат J125055.84+410625.44 могут быть отнесены к типу классических LBV, эволюционирующих до стадии звёзд Вольфа-Райе, в то время как звезда J125103.35+410635.37 может быть классифицирована как кандидат в маломассивные LBV, которые в процессе эволюции проходят стадию красного сверхгиганта.

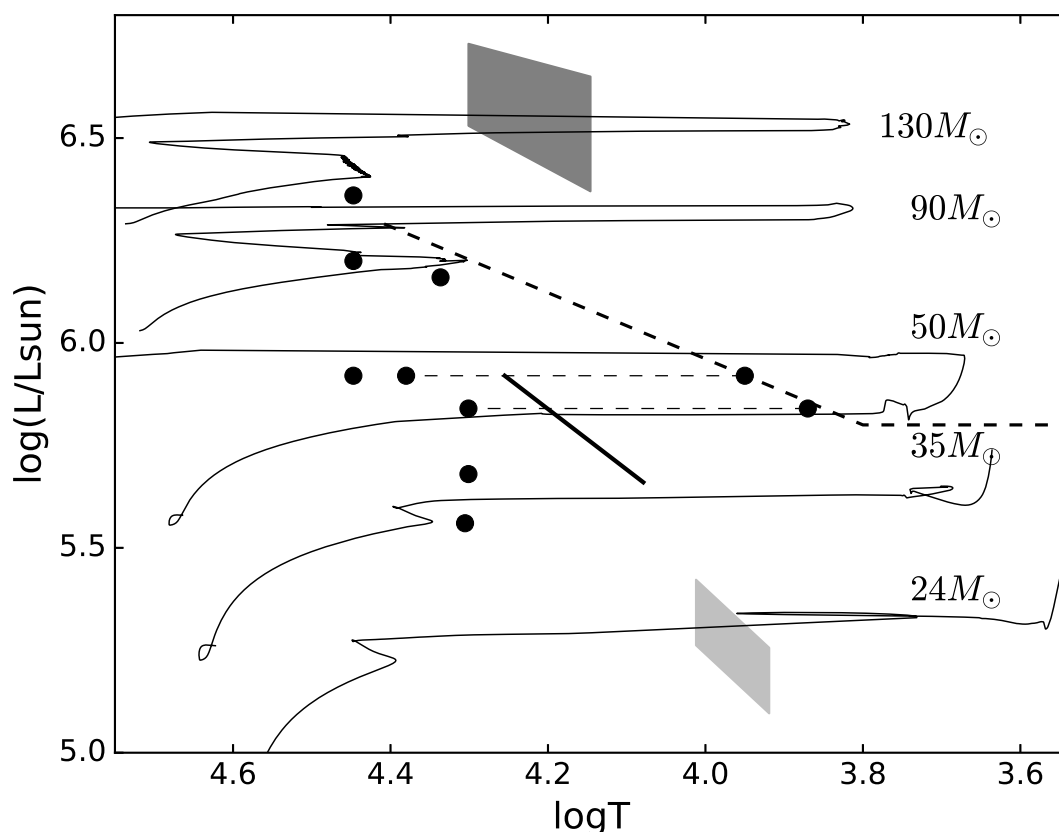


Рисунок 36 — Диаграмма «температура-светимость» для J125057.26+410723.13, J125055.84+410625.44, J125103.35+410635.37 (сверху вниз). Серые фигуры обозначают возможные диапазоны температуры и светимости объектов. Чёрной чертой обозначена нижняя граница светимости J125055.84+410625.44. На диаграмму нанесены эволюционные треки для массивных звёзд из работы [146]. Толстая штриховая линия обозначает предел Хэмфрис-Дэвидсона. Для наглядности черными кружками показаны положения подтвержденных LBV звёзд из галактик M31 и M33, а тонкие штриховые линии обозначают переходы между состояниями LBV-звёзд Var B и Var C (взяты из работы [54]).

Кандидаты в галактике NGC 247 На рисунке 37 приведена диаграмма температура-светимость, на которую нанесены положения LBV-кандидатов в галактике NGC 247. Поскольку для данной галактики нет спектроскопических оценок металличности и разные авторы используют значения от $Z = 0.004$ [148] до $Z = 0.0152$ [149], в качестве металличности NGC 247 в этой работе было использовано значение $Z = 0.008$ (как в работе [150]). Для наглядности на диа-

грамму нанесены эволюционные треки массивных звёзд из работы [146], выбранные в соответствии с принятым значением металличности. Серые области обозначают диапазоны возможных температур фотосферы и светимостей кандидатов. Использовались оценки температур фотосферы и светимостей кандидатов, полученные из аппроксимации их спектральных распределений энергии. Как видно из сравнения положений кандидатов на диаграмме с эволюционными треками звёзд различной массы, оба кандидата могут иметь начальную массу больше $40 M_{\odot}$, что характерно для классических LBV звёзд.

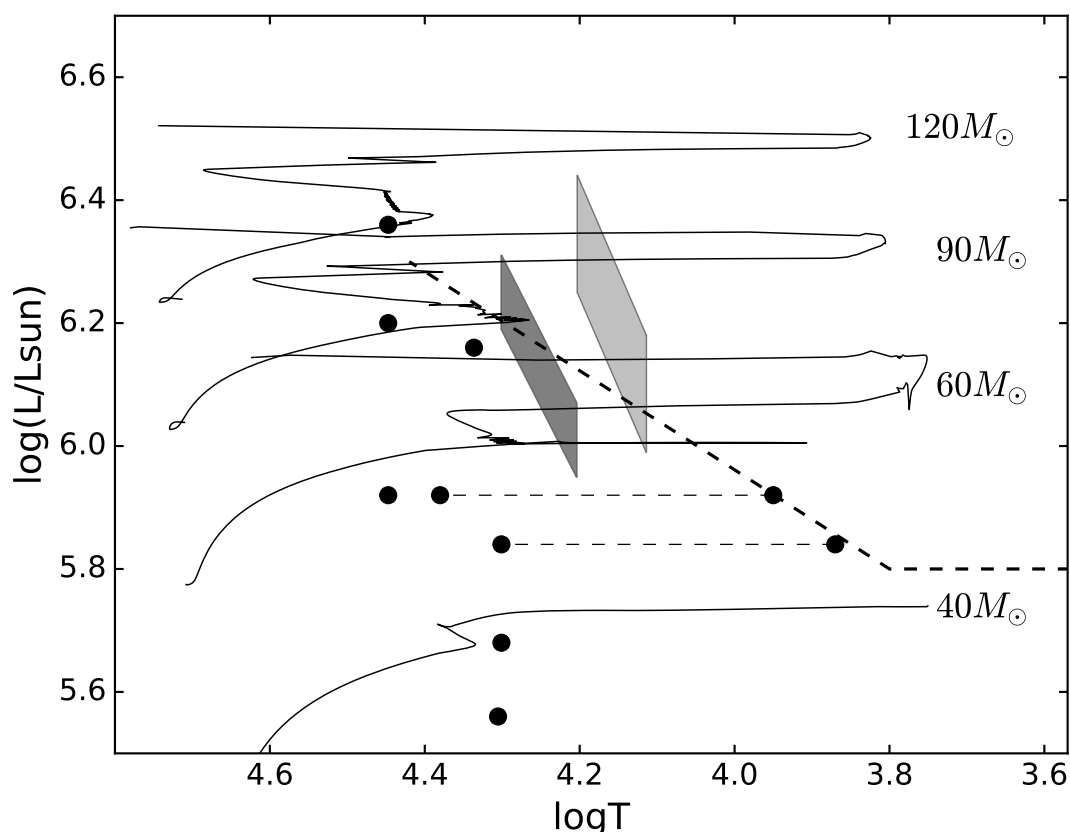


Рисунок 37 — Диаграмма температура-светимость для J004703.27-204708.4 и J004702.18-204739.93 с эволюционными треками массивных звёзд для металличности $Z = 0.008$ [146]. Возможные положения J004703.27-204708.4 и J004702.18-204739.93 показаны темно-серой и светло-серой областями соответственно. Толстая штриховая линия обозначает предел Хэмфрис-Дэвидсона. Для наглядности черными кружками показаны положения подтвержденных LBV звёзд из галактик M31 и M33, а тонкие штриховые линии обозначают переходы между состояниями LBV-звёзд Var B и Var C (взяты из работы [54]).

Кандидаты в галактике NGC 4449 Для оценки массы изучаемых кандидатов была построена диаграмма «температура-светимость» (рисунок 38) и проведено сравнение положения объектов с эволюционными треками массивных звёзд разных начальных масс [146]. Эволюционные треки выбирались в соответствии

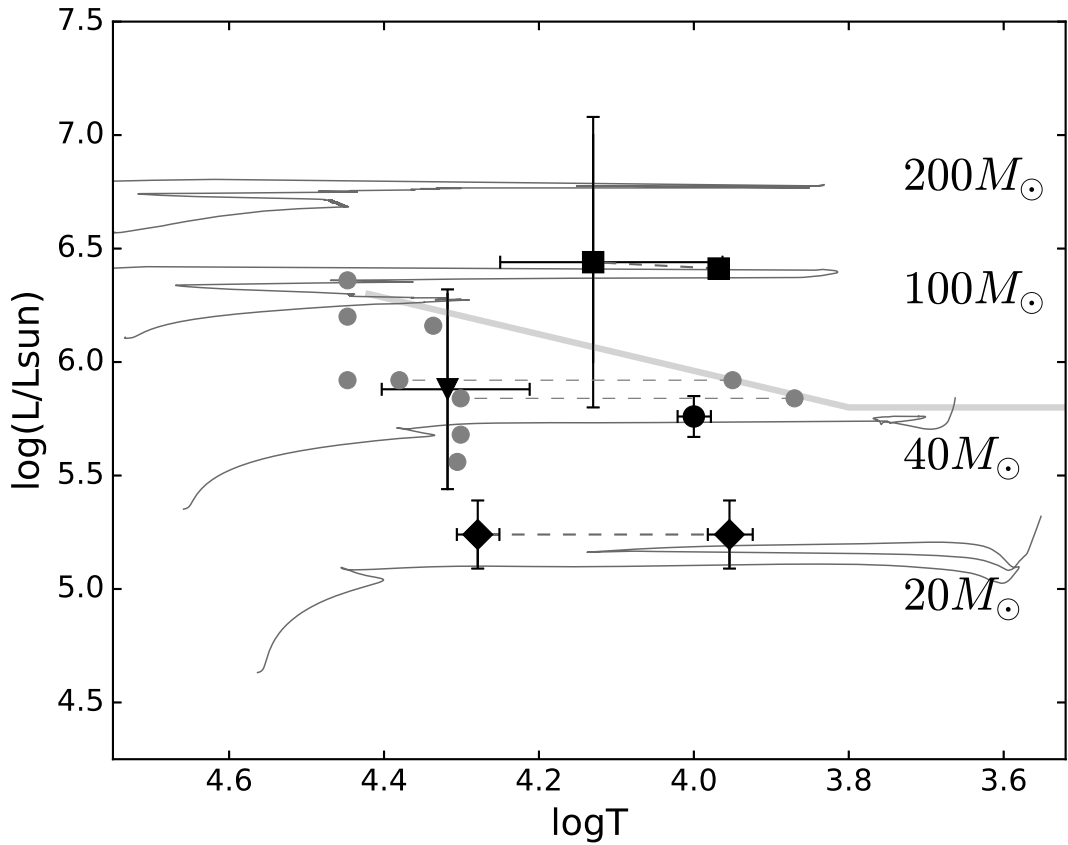


Рисунок 38 — Диаграмма "температура–светимость" с эволюционными треками массивных звёзд [146] при металличности $Z = 0.5Z_{\odot}$. Положения объектов на диаграмме обозначены кружками (J122810.94+440540.6), треугольниками (J122811.70+440550.9), квадратами (J122809.72+440514.8) и ромбами (J122817.83+440630.8). Толстой серой линией обозначен предел Хэмфрис–Дэвидсона. Тонкими штриховыми линиями обозначены переходы между состояниями объектов J122817.83+440630.8 и J122809.72+440514.8. Для наглядности серыми кружками показаны положения подтвержденных LBV звёзд из галактик M31 и M33, а тонкие штриховые линии обозначают переходы между состояниями LBV-звёзд Var B и Var C (взяты из работы [54]).

со значением металличности $Z \approx 0.5Z_{\odot}$. Оценки температур фотосферы и светимости изучаемых звёзд (в случае J122809.72+440514.8 для горячего состояния) взяты из аппроксимации спектрального распределения энергии. Для холодного состояния J122809.72+440514.8 использовались значения температуры и светимости, полученные в результате моделирования спектров с помощью кода CMFGEN.

Из диаграммы следует, что J122817.83+440630 имеет начальную массу около $20 M_{\odot}$. Звезды с такими массами в процессе эволюции могут проходить стадию красного сверхгиганта [2]. J122809.72+440514.8 имеет наибольшую начальную массу (более $100 M_{\odot}$). Темп потери массы, характерный для столь массивных звезд, позволяет им миновать стадию красного сверхгиганта [53] и эволюциони-

ровать в стадию звезды типа Вольфа-Райе. Значения масс J122810.94+440540.6 и J122811.70+440550.9 находятся между указанными крайними значениями. Таким образом, массы всех четырех звёзд вполне характерны для звёзд LBV или массивных сверхгигантов.

3.3 Спектральная классификация кандидатов

J125057.26+410723.13. Как уже говорилось ранее, кандидат J125057.26+410723.13 показывает наблюдательные особенности, характерные для подтвержденных LBV звезд. В 2015 году его блеск в полосе V составлял 19.41 ± 0.13^m , а в спектре наблюдалось множество разрешенных и запрещенных линий железа. Такой вид спектра характерен для LBV в холодном состоянии. В 2018 году его блеск уменьшился приблизительно на 1^m в полосе V, при этом линии железа в спектре ослабли. К сожалению, в спектре 2018 года (как и в спектре 2020 года) из-за низкого отношения сигнал-шум не удастся отождествить спектральные линии, однако, можно заметить что в сравнении с наблюдениями 2015 года картина спектральных линий изменилась значительно. Подобное поведение звезды можно описать переменностью типа S Dor, которая является главным классификационным признаком LBV звёзд. Этот вывод подтверждается обнаруженным изменением цвета (b-v) в зависимости от яркости звезды, характерным для подтверждённых LBV. Полная амплитуда переменности J125057.26+410723.13 составила $\Delta V = 1.18 \pm 0.12^m$ и $\Delta B = 0.90 \pm 0.12^m$, а полученная оценка болометрической светимости $-\log(L_{\text{bol}}/L_{\odot}) = 6.5 \pm 0.2$, что сопоставимо со светимостью ярчайших из известных LBV звезд. На основании наблюдаемых характеристик кандидат J125057.26+410723.13 был классифицирован как LBV звезда.

J125055.84+410625.44. Кандидат J125055.84+410625.44 также демонстрирует спектральные особенности, наблюдаемые у изученных LBV звёзд, в частности линии эмиссионные He I и Fe II с профилями P Cyg, линии водорода с широкими компонентами и ассиметричным профилем. В спектре этого кандидата наблюдалось уменьшение эквивалентных ширин большинства линий с 2015 по

2018 годы, что сопровождалось понижением блеска $\Delta V \approx 0.2^m$. С 2014 по 2018 годы фотометрическая переменность кандидата составила $\Delta B = 0.43 \pm 0.07^m$ в полосе В и $\Delta V = 0.55 \pm 0.08^m$ в полосе V. Полученная в работе оценка болометрической светимости составила $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) > 5.9$, поэтому положение J125055.84+410625.44 на диаграмме «температура–светимость» соответствует положению подтверждённых LBV звёзд (рис. 36). Несмотря на имеющуюся фотометрическую переменность, высокую светимость и эмиссионный спектр, J125055.84+410625.44 был классифицирован как LBV–кандидат, поскольку его спектральная переменность не столь существенна.

J125103.35+410635.37. Как отмечалось ранее, в спектре J125103.35+410635.37 присутствуют линии водорода $H\alpha$, $H\beta$ с широкими компонентами и слабые линии железа Fe II. Полученная оценка болометрической светимости объекта составляет $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) \approx 5.3 \pm 0.2$, что соответствует маломассивным LBV. Кандидат не показывает значительной фотометрической переменности ($\Delta V = 0.13 \pm 0.08^m$). Ввиду низкой переменности J125103.35+410635.37 остаётся в статусе LBV кандидата. Для более детальной классификации необходимы дальнейшие наблюдения.

J004703.27-204708.4. В предыдущей главе отмечалось, что спектр кандидата J004703.27-204708.4, полученный на телескопе Subaru, содержит множество ярких эмиссионных линий, которые ассоциируются с яркими голубыми переменными. Некоторые из этих спектральных линий, в частности линии водорода и He I, имеют профили типа P Cyg. Кандидат показал значительную переменность блеска $\Delta B = 0.74 \pm 0.09^m$ и $\Delta V = 0.88 \pm 0.09^m$ с 2005 по 2011 годы. С 2011 по 2018 годы блеск кандидата изменился лишь на $\Delta V \approx 0.3^m$, и, поскольку оба из имеющихся спектров объекта были получены лишь в 2016 и 2017 годах, заметную спектральную переменность объекта обнаружить не удалось. Оценка болометрической светимости объекта составляет $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.11_{-0.16}^{+0.20}$, что сравнимо со светимостями LBV звёзд. При этом избыток излучения в ближнем ИК диапазоне, наблюдаемый в спектральном распределении энергии J004703.27-204708.4, в 2 раза выше значений, наблюдаемых у подтверждённых

LBV: у кандидата J004703.27-204708.4 отношение потоков в полосе V и полосе 3.6 мкм составляет $F_V/F_{3.6\mu m} \approx 60$, тогда как подтвержденные LBV имеют значение отношения $F_V/F_{3.6\mu m} > 100$ (например, [1]). Однако, вполне вероятно, что наблюдаемый у J004703.27-204708.4 избыток излучения в ИК диапазоне может быть связан с недооценкой вклада соседней звезды и туманности, окружающей объект.

Существенная фотометрическая переменность делает этот объект надежным кандидатом в LBV звёзды, однако, для подтверждения статуса LBV необходимы дальнейшие спектральные и фотометрические наблюдения.

J004702.18-204739.93. Фотометрия кандидата J004702.18-204739.93 не выявила его заметной переменности, которая составляет всего $\Delta V \approx 0.29 \pm 0.09^m$ с 2011 по 2018 годы. Его спектр показывает запрещенные эмиссионные линии [Ca II] $\lambda\lambda$ 7291,7324 и [O I] $\lambda\lambda$ 6300,6364. Кроме того, J004702.18-204739.93 показывает заметный ИК-избыток, который характерен для звёзд обоих типов. Однако, из-за отсутствия линий поглощения в спектре объект нельзя отнести к теплым гипергигантам. Принимая во внимание наличие запрещенных линий железа [Fe II] наряду с запрещенными линиями кислорода и кальция, объект может быть классифицирован как B[e]-сверхгигант.

J122810.94+440540.6. Как отмечалось ранее, спектр J122810.94+440540.6 показывает линии Fe II, [Fe II], однако, в нем не наблюдаются линии [O I] $\lambda\lambda$ 6300,6363 и [Ca II] $\lambda\lambda$ 7291,7323. В то же время линии Fe II, [Fe II] проявляются в спектрах звёзд разных типов, в том числе и у LBV. В спектральном распределении энергии этого объекта наблюдается заметный избыток ИК-излучения в диапазоне 1-2 μm (Рис. 33а). Однако этот избыток невелик (менее чем в 2 раза выше модельной кривой в полосе F160W, примерно соответствующей полосе H), поэтому однозначно установить его источник без данных в среднем и дальнем ИК диапазоне, поскольку источником наблюдаемого избытка может быть как f-f излучение ветра, так и околозвездная оболочка, состоящая из теплой пыли. Кроме того, J122810.94+440540.6 не продемонстрировал заметной переменности блеска (она составляет менее 0.3^m во всех доступных фильтрах). С

учётом вышеперечисленных фактов, точная классификация звезды затруднена, поскольку J122810.94+440540.6 может быть либо LBV, либо V[e]-сверхгигантом. Поэтому на данный момент эта звезда остаётся в статусе LBV кандидата.

J122811.70+440550.9. По спектральным особенностям объект J122811.70+440550.9 схож с предыдущим, однако в его спектре присутствуют линии [O I] $\lambda\lambda$ 6300,6363, при этом линии кальция [Ca II] не наблюдаются. Линии нейтрального кислорода могут излучаться как оболочкой самой звезды, так и окружающей её туманностью. Как отмечалось ранее, SED этого объекта аналогичен спектральному распределению V[e]-сверхгиганта J004415.00 [130]. Применение той же модели, которая применялась к J004415.00 и учитывала f-f и f-b излучение, к спектральному распределению энергии J122810.94+440540.6 дало хорошее согласие и указало на присутствие ионизированной оболочки вокруг звезды. Таким образом, объект J122811.70+440550.9 может быть классифицирован как кандидат в V[e]-сверхгиганты.

J122817.83+440630.8. Звезда J122817.83+440630.8 продемонстрировала значительную переменность блеска ($\Delta R = 2.15 \pm 0.13^m$) и формы спектрального распределения энергии. Отсутствие спектральных данных не позволяет сделать однозначный вывод о типе объекта. Тем не менее, необходимо отметить, что такие изменения яркости характерны только для звёзд типа LBV, поскольку только они являются сильно переменными объектами среди всего набора звёзд высокой светимости [95]. Другими типами объектов, обладающих сравнимой амплитудой изменения блеска являются различные транзиентные рентгеновские двойные системы. Однако, исследование изображений, полученных космической рентгеновской обсерваторией Chandra, не выявило источников рентгеновского излучения в области расположения J122817.83+440630.8. Таким образом, звезда J122817.83+440630.8 может быть отнесена к типу LBV звёзд.

J122809.72+440514.8. Спектр J122809.72+440514.8 содержит множество линий, характерных для LBV. Эта звезда также продемонстрировала спектральную и фотометрическую переменность, максимум которой находится в красном

диапазоне $\Delta I = 0.69 \pm 0.13^m$. Спектральное распределение энергии этого объекта не показывает явного избытка ИК-излучения, что указывает на отсутствие горячей газопылевой оболочки вокруг звезды. По наблюдаемым особенностям J122809.72+440514.8 может быть классифицирована как LBV звезда.

Выводы

В главе представлены результаты определения фундаментальных параметров кандидатов из галактик NGC 4736, NGC 247, NGC 4449, а также их спектральная классификация.

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. Температура фотосферы J125057.26+410723.13 и J125103.35+410635.37 оценивалась также путём определения истинного 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. 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.

По наблюдаемым спектральным линиям температура фотосферы J004703.27-204708.4 и J004702.18-204739.93 из галактики NGC 247 грубо оценена как $T = 20000 \pm 5000$ и $T = 15000 \pm 5000$ К, соответственно. Путём аппроксимации спектральных распределений энергии объектов чернотельной функцией получена более точная оценка температур фотосферы $T = 18000 \pm 2000$ К при $A_V \approx 0.9$ для J004703.27-204708.4, и $T = 15000 \pm 2000$ К при $A_V \approx 0.7$ для J004702.18-204739.93. Поскольку в SED обоих кандидатов присутствуют избытки излучения в ближнем ИК диапазоне, которые, вероятно, связаны с излучением газопылевых околозвёздных оболочек, добавление дополнительных компонентов чернотельного излучения при аппроксимации SED позволило оценить температуру эти оболочек как $T_{\text{dust}} \approx 1400$ К для J004703.27-204708.4 и $T_{\text{dust}} \approx 1300$ К J004702.18-204739.93. Оценки болометрических светимостей кандидатов J004703.27-204708.4 и J004702.18-204739.93 составили $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.11^{+0.20}_{-0.16}$ и $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.24^{+0.20}_{-0.25}$, соответственно.

Температуры фотосферы кандидатов в галактике NGC 4449 и их светимости оценивались путём аппроксимации их спектральных распределений энергии чернотельной моделью: для J122810.94+440540.6 оценки температуры и свети-

мости составили $T_{\text{SED}} = 10000 \pm 500$ К при $A_V \approx 0.4^m$ и $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 5.76 \pm 0.09$; для J122811.70+440550.9 – $T_{\text{eff}} = 20800 \pm 4500$ К при $A_V \approx 0.5^m$ (мера эмиссии $EM = 1.47 \times 10^{39} \pm 4.37 \times 10^{38}$ см⁻⁵) 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 при $A_V \approx 0.6^m$, а оценка светимости $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 5.12 \pm 0.15$.

Для кандидата J122809.72+440514.8 из NGC 4449 не удалось добиться удовлетворительных результатов совместной аппроксимации SED в «горячем» и «холодном» состоянии при постоянной болометрической светимости. При выборе светимости в качестве свободного параметра аппроксимации получены следующие параметры: $T_{\text{eff}} = 7600 \pm 300$ К и $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.20 \pm 0.11$ для «холодного» состояния и $T_{\text{eff}} = 13500 \pm 4300$ К, $\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.44 \pm 0.64$ для «горячего» состояния при значении поглощения $A_V = 0.6^m$. Разница в значениях болометрической светимости звезды в двух состояниях, вероятно, связана с недооценкой температуры фотосферы кандидата в холодном состоянии из-за наличия бальмеровского скачка. Применение кода CMFGEN для расчёта модели атмосферы кандидата в холодном состоянии дало оценки температуры фотосферы $T_{\text{eff}} = 9300$ К и темпа потери массы $\dot{M} = 5.2 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$. Болометрическая светимость определялась путем 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 целом, значения болометрической светимости, соответствующие «горячему» ($\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.44 \pm 0.64$) и «холодному» ($\log(L_{\text{Bol}}/L_{\odot}) = 6.41 \pm 0.03$) состояниям, совпадают в пределах ошибок.

Для всех объектов построена диаграмма «температура–светимость». На основе сравнения положений звёзд на диаграмме с эволюционными треками различной массы получены оценки начальной массы звёзд (от ≈ 20 до $\approx 130 M_{\odot}$).

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 B[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.

4 Оценка возраста звёздного окружения кандидатов в галактиках NGC 247 и NGC 4449

Помимо классического представления об LBV звёздах как о переходных объектах между одиночными массивными O-звездами и звездами типа Вольфа-Райе, существуют и другие подходы к объяснению феномена LBV звёзд, в частности рассмотрение LBV как результата эволюции тесных двойных систем. Этот подход основывается на несоответствии наблюдаемых возрастов LBV и их родительских скоплений. Одним из наиболее надёжных способов оценки возраста звёзд с наибольшей массой является изучение пространственной связи с другими звездами, которые должны иметь очень короткое время жизни, то есть с ранними O-звёздами, которые в процессе своей эволюции достигнут стадии LBV. В работе Смита и Томблсона [151] проведено пространственное сравнение массивных звёзд и изучено совокупное распределение расстояний от подтипов O-звезд, LBV, WR-звёзд и других классов проэволюционировавших звёзд до ближайших звёзд O-типа в Большом Магеллановом облаке. В результате этого исследования было обнаружено, что LBV и LBV-кандидаты значительно изолированы от массивных звёзд O-типа, причём гораздо сильнее, чем допускают модели эволюции одиночной массивной звезды. На основании этого результата авторы выдвинули гипотезу о том, что наблюдаемая изоляция LBV может быть объяснена только в случае если они являются результатом эволюции тесных двойных звёзд. В работе Хэмфрис и соавторов [2] подчёркнуто, что использованная в работе [151] выборка является неоднородной и включает в себя классические LBV, LBV с меньшими светимостями (см. следующий абзац), LBV кандидаты, а также эруптивные LBV типа η Car, которые имеют различный эволюционный статус. Когда эти типы разделены, статистика по расстояниям до ближайших массивных звёзд O-типа соответствует стандартным ожиданиям.

Однако, дискуссия о природе LBV на этом не закончилась. В работе Смита 2016 года [152] повторно проведено сравнение распределений расстояний от LBV звёзд до звёзд O-типа, но уже с учётом предложенного в работе [2] разде-

ления классических LBV, LBV с меньшими светимостями и LBV кандидатов, и было показано, что даже с учётом разделения LBV слишком изолированы в предположении эволюции одиночной массивной звезды. Было обнаружено, что наиболее яркие подтвержденные LBV имеют окружение, подобное звездам позднего O-типа, средний возраст которых примерно в два раза больше, чем предполагаемый возраст данных LBV в сценарии эволюции одиночной массивной звезды. Также было показано, что подтвержденные LBV с более низкой светимостью имеют распределение, подобное красным сверхгигантам, большая часть которых имеют начальные массы 10–15 M_{\odot} , что составляет менее половины от массы LBV с низкой светимостью (25–40 M_{\odot} , [2]). Таким образом, вопрос о том, является ли LBV стадией эволюции одиночной массивной или результатом эволюции двойной системы остаётся открытым.

Если LBV является стадией эволюции одиночной массивной звезды, то её положение на диаграмме Герцшпрунга-Рессела должно согласовываться с изохроной, соответствующей возрасту звёзд той области, в которой она родилась. Если же LBV является результатом эволюции двойной системы с обменом масс, то её положение на диаграмме будет соответствовать более молодым одиночным звёздам, и не согласовываться с возрастом звёзд скопления. Таким образом, исследование диаграмм «цвет–звёздная величина» для LBV и звёзд их родительских скоплений, определение их возрастов может пролить свет на природу LBV-феномена.

В данной главе представлены результаты оценки возрастов звёздного окружения исследуемых объектов в галактиках NGC 247 и NGC 4449.

4.1 Звёздное окружение LBV кандидатов в галактике NGC 247

Исследуемые LBV-кандидаты в галактике NGC 247 расположены вблизи звездных ассоциаций, в которых, вероятно, они образовались. Как объекты, так и ассоциации находятся в богатых звездообразующих областях (см. рисунок 39). Для оценки возраста этих звёздных областей была проведена PSF-фотометрия и построены диаграммы "цвет–звёздная величина". Рассматриваемые области ограничивались квадратами размером $8'' \times 8''$ и $16'' \times 16''$.

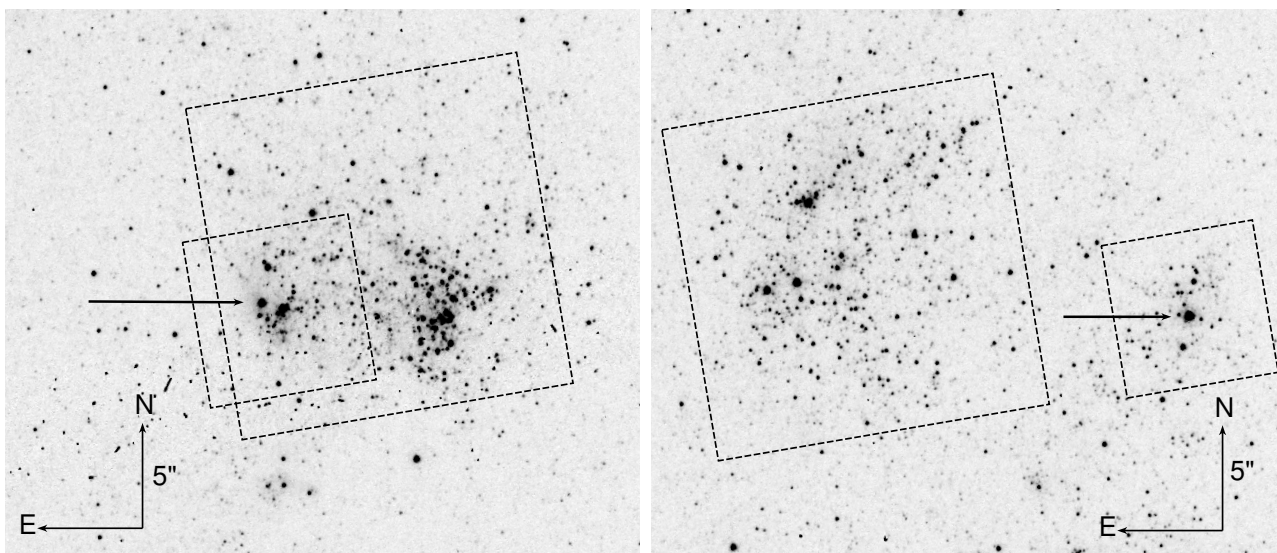


Рисунок 39 — Изображение областей около J004703.27-204708.4 (слева) и J004702.18-204739.93 (справа) в фильтре F435W телескопа HST/ACS/WFC. Исследуемые звёзды обозначены стрелкой. Квадраты обозначают звёздные ассоциации размерами $8'' \times 8''$ и $16'' \times 16''$, которые были использованы для построения диаграмм "цвет-звёздная величина".

Фотометрические измерения выбранных регионов выполнены в пакете программ **DOLPHOT**. Подробное описание использованных процедур приведено в главе 1. Фотометрия проводилась по архивным изображениям, полученным в фильтрах F435W и F606W HST/ACS/WFC (2011/10/11).

На основе полученных фотометрических измерений в фильтрах F435W и F606W были построены диаграммы «цвет-звёздная величина» (CMD) с учетом среднего поглощения в галактике в NGC 247 $E(B - V) = 0.18$ [153] (рисунок 40). На рисунок также были нанесены теоретические изохроны с возрастами 5, 10 и 30 миллионов лет из работы [154], взятые с сайта Osservatorio Astronomico di Padova¹⁴. Значение металличности для изохрон выбрано $Z = 0.008$ в соответствии с обилием металлов в NGC 247 [150]. При вычислении изохрон в качестве начальной функции масс [155, 156] был выбран канонический степенной закон, учитывающий неразрешенные двойные системы.

Сравнение положений звёзд ассоциаций на диаграмме с теоретическими изохронами показало, что звездообразование в рассматриваемых областях, скорее всего, представляет собой непрерывный процесс, поскольку положение звёзд главной последовательности и красных сверхгигантов описываются широким набором изохрон разного возраста. Однако положение большинства звёзд глав-

¹⁴<http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd>

ной последовательности и верхней части ветви красных сверхгигантов на диаграмме хорошо описывается изохронами с возрастом порядка 10 миллионов лет. Стоит отметить, что оба изучаемых LBV-кандидата лежат на диаграмме заметно выше, чем большинство звёзд из соседних ассоциаций. Если предположить, что они являются одиночными звездами, то возраст J004703.27-204708.4 и J004702.18-204739.93 окажется значительно меньшим возраста звёзд ассоциаций. Этот парадокс может быть разрешён, если учесть, что верхняя часть диаграммы «цвет–звёздная величина» слабо населена, и мы можем переоценивать возраст родительской области звездообразования: возраст последней вспышки звездообразования может быть намного меньше и соответствует возрасту кандидатов. Это предположение подтверждается упомянутой выше яркой звездой, которая не является LBV-кандидатом, но находится в той же области диаграммы, что и кандидаты.

Однако положение изучаемых LBV-кандидатов на диаграмме «цвет–звёздная величина» можно объяснить иным путём. Если предположить, что обе звезды являются результатом эволюции тесных двойных с обменом массой, и наблюдаемые объекты были "омоложены-благодаря аккреции [151, 157], то таким образом можно объяснить явную обособленность исследуемых кандидатов от звёзд ближайших ассоциаций на наблюдаемой диаграмме «цвет–звёздная величина». Это означает, что начальные массы объектов J004703.27-204708.4 и J004702.18-204739.93 могут быть намного меньше, чем в случае одиночной звезды. Тем не менее, как было сказано выше, изучаемые звёздные ассоциации показывают признаки непрерывного звездообразования и вполне вероятно, что объекты J004703.27-204708.4 и J004702.18-204739.93 действительно несколько моложе звёзд соседних ассоциаций.

4.2 Звёздное окружение LBV кандидатов в галактике NGC 4449

Объекты J122810.94+440540.6, J122811.70+440550.9, J122817.83+440630.8 и J122809.72+440514.8 также расположены вблизи звёздных ассоциаций. Аналогично случаю выше, для оценки возраста звёздного окружения объектов была выполнена PSF-фотометрия в программе **DOLPHOT** и построены диаграм-

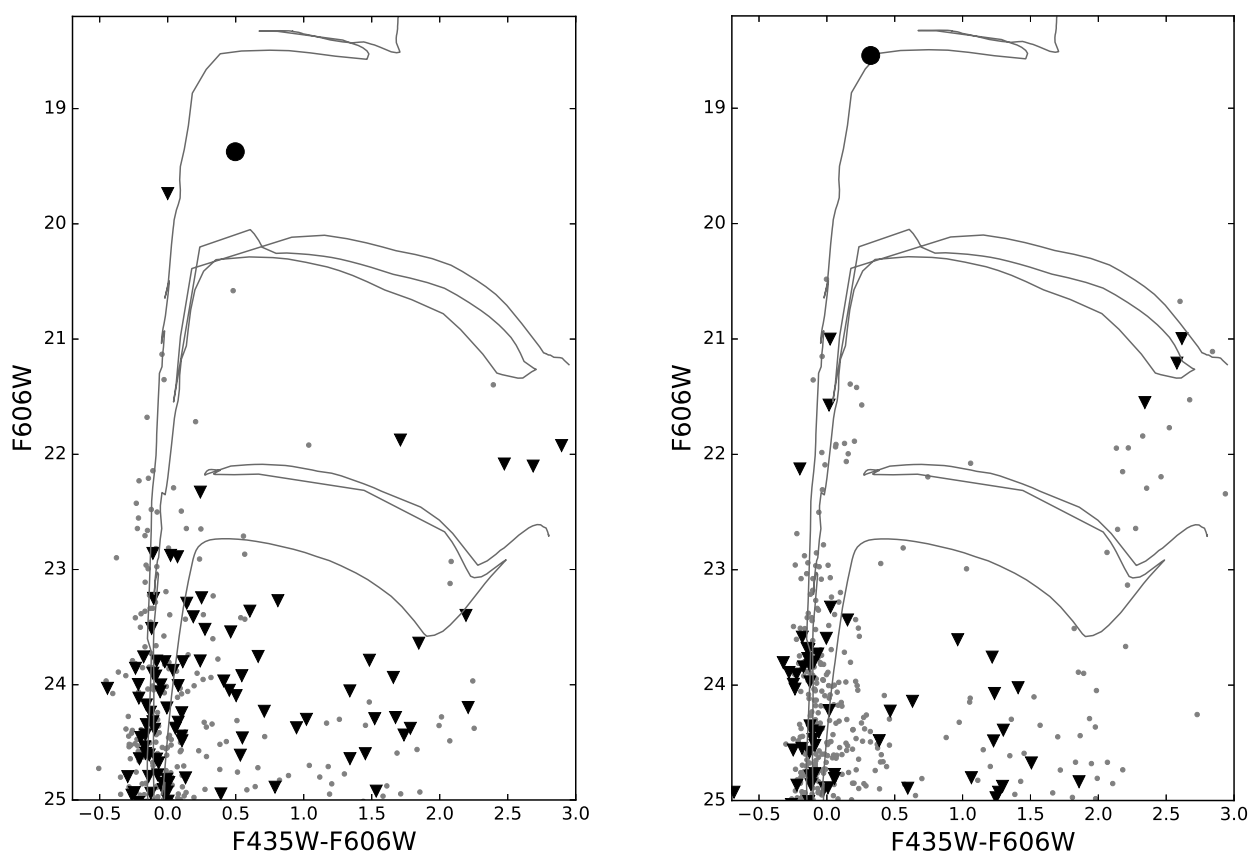


Рисунок 40 — Диаграммы «цвет–звёздная величина», построенные для звёздных скоплений, расположенных вблизи J004703.27-204708.4 (слева) и J004702.18-204739.93 (справа). Серые точки обозначают звёзды из большой области размерами (16'' × 16''), черными треугольниками отмечены положения звёзд из малых областей размерами (8'' × 8''), черными кружками обозначены исследуемые кандидаты в LBV. Серыми линиями обозначены теоретические изохроны с возрастaми 5, 10 и 30 млн. лет (сверху вниз) из работы [154] для значения металличности $Z = 0.008$.

мы «цвет-звёздная величина». Для J122810.94+440540.6, J122817.83+440630.8 и J122809.72+440514.8 были выбраны две области: малая, которая соответствует размеру ближайших групп звёзд, и большая, которая охватывает всю область звездообразования вблизи изучаемой звезды (рисунок 41). В случае J122811.70+440550.9 были выбраны две соседние области звездообразования. Большая и малая области выбраны с целью проверить нет ли систематической разницы между возрастом локальной группы звёзд (вокруг объекта) и всей области звездообразования. В случае отсутствия такой разницы, оценкой возраста окружения считалось значение, соответствующее возрасту всей области звездообразования. Размеры областей указаны в подписи к рисунку 41.

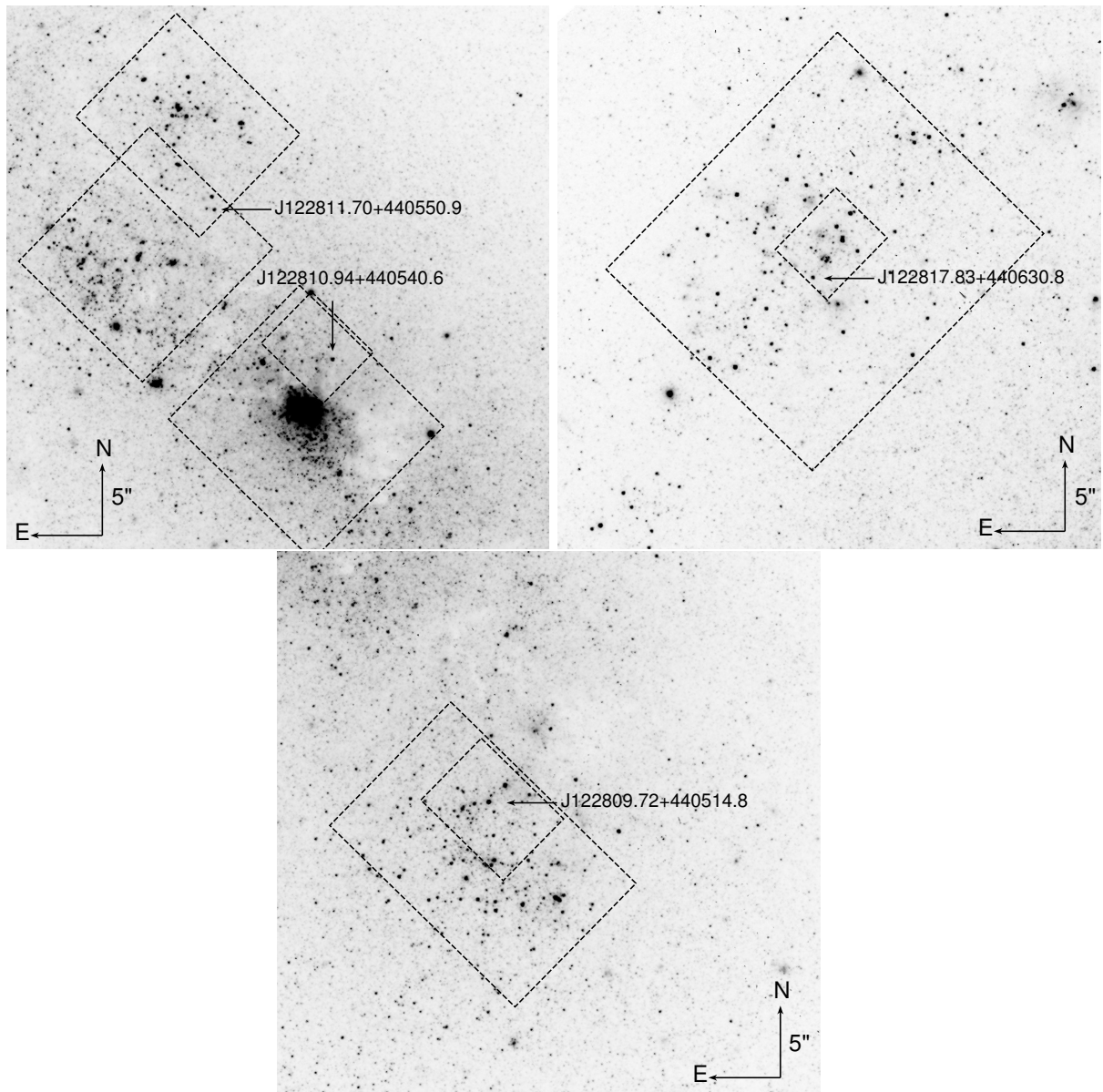


Рисунок 41 — Изображения J122810.94+440540.6 и J122811.70+440550.9 (слева), J122817.83+440630.8 (посередине), J122809.72+440514.8 (справа) в фильтре F814W камеры HST/ACS/WFC. Прямоугольниками обозначены области звездообразования, которые использовались для построения диаграмм "цвет-звёздная величина". Изучаемые объекты отмечены стрелкой. Размеры областей рядом с J122810.94+440540.6 составляют $6'' \times 6''$ и $14'' \times 13''$; для J122811.70+440550.9 — $12'' \times 10''$, $12'' \times 12''$; J122817.83+440630.8 — $5'' \times 6''$, $20'' \times 23''$; J122809.72+440514.8 — $8'' \times 8''$, $18'' \times 12''$.

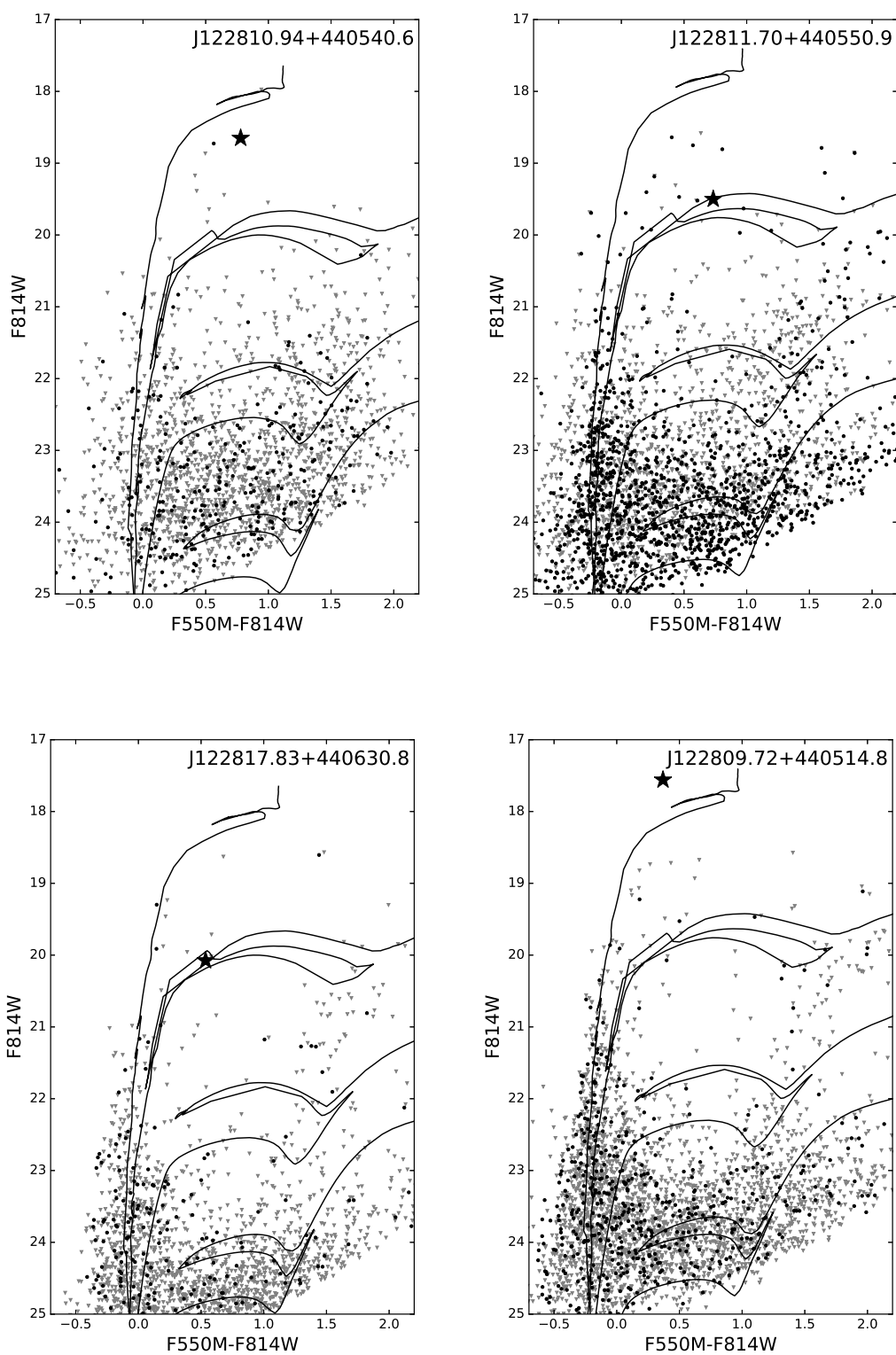


Рисунок 42 — Диаграммы "цвет-звёздная величина" построенные для звёздного окружения J122810.94+440540.6, J122811.70+440550.9, J122817.83+440630.8 и J122809.72+440514.8. Серые треугольники обозначают звёзды из больших регионов, чёрными кружками отмечены звёзды из малых областей вблизи изучаемых звёзд, которые обозначены чёрными звёздами. Теоретические изохроны возраста 5, 10, 30 и 100 миллионов лет (сверху – вниз) показаны чёрным цветом.

Фотометрия звёзд выбранных областей проводилась с использованием архивных данных, полученных в фильтрах F550M (2005/11/18) и F814W (2005/11/17) камеры HST/ACS/WFC. На рисунке 42 показаны диаграммы «цвет-звёздная-величина» для изучаемых областей звездообразования, и нанесены изохроны разных возрастов для металличности $Z = 0.5Z_{\odot}$ [140]. В качестве начальной функции масс был тот же закон, что и для предыдущего случая. Изохроны исправлялись за межзвёздное поглощение, которое варьировалось от значения галактического поглощения на луче зрения до максимального значения, измеренного по спектральным данным. Оптимальные значения покраснения определялись индивидуально для каждой области путем сравнения покраснённой изохроны с наблюдаемой главной последовательностью звёзд из выбранных областей. В результате были получены оценки покраснения $A_V \approx 0.5^m$ для звездного окружения J122810.94+440540.6 и J122817.83+440630.8, что вполне согласуется со средним внутренним покраснением в галактике NGC 4449 ($A_V \approx 0.6^m$, [158]). Для звёздных групп вблизи J122811.70+440550.9 и J122809.72+440514.8 оценка межзвёздного поглощения оказалась значительно ниже и составила $A_V \approx 0.1^m$.

Положение звёзд выбранных областей на CMD соответствует либо непрерывному звездообразованию в течение по крайней мере последних 100 миллионов лет, либо нескольким эпизодам звездообразования в течение того же периода времени. При этом возраст самых молодых звезд, в том числе J122810.94+440540.6, J122811.70+440550.9 и J122817.83+440630.8, составляет приблизительно 5-10 миллионов лет. Самые молодые звёзды, наряду с исследуемыми объектами, вероятно, образовались в результате одной из последних вспышек звездообразования. При этом разницы между положением звёзд из малых и больших областей на CMD не обнаружено.

Звезда J122809.72+440514.8, в отличие от остальных трёх исследуемых звёзд NGC 4449, лежит на диаграмме заметно выше основной массы окружающих звёзд. Однако, как и в случае звездного окружения кандидатов в галактике NGC 247, существуют факторы, которые могут приводить как к завышению, так и к занижению возраста окружающего населения. Первый связан с от-

носителю небольшим количеством звёзд в выбранных регионах, из-за чего верхняя часть диаграммы «цвет-звёздная величина» скудно заселена. Следовательно, возможна переоценка возраста последней вспышки звездообразования, как в случае J122809.72+440514.8. В то же время среди ярких звёзд могут быть неразрешенные группы звезд, что может привести к недооценке возраста самых молодых объектов. К объекту J122809.72+440514.8 также можно применить рассуждения про "омоложение-в результате аккреции в тесных двойных системах, которые изложены выше. В такой интерпретации начальная масса J122809.72+440514.8 также должна быть намного ниже, чем в предположении одиночной звезды, а возраст, соответственно, выше.

4.3 Выводы

В данной главе изложены 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. Положение большего числа звёзд в областях вблизи кандидатов в галактике NGC 247 хорошо описывается изохронами с возрастом 10 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 описывается изохронами возраста 5-10 млн. лет. Кандидаты J004703.27-204708.4, J004702.18-204739.93 и J122809.72+440514.8 расположены заметно выше остальных звёзд на диаграмме, что можно интерпретировать двумя способами:

- В виду малой населённости верхней части диаграмм вероятно переоценка возраста звёзд выбранных областей: возраст последней вспышки звездообразования может быть намного меньше и соответствует возрасту кандидатов.
- 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, за счёт чего наблюдается более молодой возраст;

Более точные оценки возраста требуют информацию о значениях многих параметров, таких как скорость вращения звезд, локальная металличность, которая может варьироваться даже внутри одной области, начальная функция масс и другие. Вопрос о наблюдаемом возрасте изучаемых объектов и соседних звёздных скоплений требует более детального изучения.

Заключение

В ходе выполнения диссертационной работы все поставленные задачи были выполнены. Результаты и выводы работы:

- По результатам поиска ярчайших звёзд за пределами Местной группы галактик по спектроскопическим данным, полученным на телескопах БТА САО РАН и SALT, были обнаружены 9 LBV-кандидатов в галактиках NGC 4736, NGC 247 и NGC 4449. Анализ спектров этих кандидатов (кроме J122817.83+440630.8) выявил характерные для подтверждённых LBV звёзд спектральные особенности: множество эмиссионных линий железа Fe II и гелия He I, широкие компоненты бальмеровских линий водорода эмиссионные линии азота N II, кремния Si II, а также запрещенные линии [Fe II], [N II] и другие. Некоторые спектральные линии, например, Fe II и He I, наблюдаемые в спектрах кандидатов J125055.84+410625.44, J004703.27-204708.4 и J122809.72+440514.8, имеют профили типа P Cyg. Заметную спектральную переменность показали кандидаты J125057.26+410723.13 и J122809.72+440514.8. Для всех объектов, за исключением J125055.84+410625.44, получена оценка межзвёздного поглощения A_V .
- Проведены фотометрические измерения всех 9 объектов по архивным данным наземных телескопов, космического телескопа им. Хаббла, а также новых данных, полученных на российских телескопах. Фотометрия выявила существенные изменения блеска у следующих объектов: J125057.26+410723.13 ($\Delta V = 1.18 \pm 0.12^m$, $\Delta B = 0.90 \pm 0.12^m$), J125055.84+410625.44 ($\Delta B = 0.43 \pm 0.07^m$, $\Delta V = 0.55 \pm 0.08^m$), J004703.27-204708.4 ($\Delta B = 0.74 \pm 0.09^m$, $\Delta V = 0.88 \pm 0.09^m$), J122817.83+440630.8 ($\Delta R = 2.15 \pm 0.13^m$) и J122809.72+440514.8 ($\Delta V = 0.48 \pm 0.14^m$, $\Delta I = 0.69 \pm 0.13^m$). Вид зависимости цвета ($B - V$) от блеска в фильтрах B и V, построенный для J125057.26+410723.13, характерен для хорошо изученных LBV звёзд типа V532 и AF And из галактик M 33 и M 31 соответственно.
- Для всех объектов были получены оценки температур фотосферы и бо-

лометрических светимостей, для чего применялись различные методы. Для объекта J122809.72+440514.8 получена оценка темпа потери массы ($\dot{M} = 5.2 \times 10^{-3} M_{\odot} yr^{-1}$) и радиуса фотосферы ($\approx 620 R_{\odot}$). Из сравнения положений объектов на диаграмме «температура-светимость» с эволюционными треками для массивных звёзд получены предварительные оценки начальных масс.

- Обнаружены избытки излучения в ближнем ИК диапазоне в спектральных распределениях энергии объектов J004703.27-204708.4, J004702.18-204739.93 и J122810.94+440540.6. У кандидатов J004703.27-204708.4 J004702.18-204739.93 возможным источником избытка являются околозвёздные газопылевые оболочки, температура которых оценена как $T_{dust} \approx 1400$ К для J004703.27-204708.4 и $T_{dust} \approx 1300$ К J004702.18-204739.93. Происхождение ИК-избытка, наблюдаемого в SED J122810.94+440540.6, не установлена из-за недостатка наблюдательных данных в более далёком ИК диапазоне. В спектральном распределении объекта J122811.70+440550.9 обнаружен вклад излучения f-f и f-b, что указывает на присутствие ионизованной околозвёздной оболочки, наблюдаемой у V[e]-сверхгигантов.
- По наблюдаемым характеристикам (спектральные линии, SED и фотометрия) 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]-сверхгигант; 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.
- Анализ диаграмм «цвет-звёздная величина», построенных для областей звездообразования вблизи кандидатов в галактиках NGC 247 и NGC 4449, показал признаки непрерывного звездообразования в изучаемых областях. Положение большего числа звёзд в областях вблизи кандидатов в галак-

тике NGC 247 хорошо описывается изохронами с возрастом 10 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 описывается изохронами возраста 5-10 млн. лет. При этом кандидаты J004703.27-204708.4, J004702.18-204739.93 и J122809.72+440514.8 расположены заметно выше остальных звёзд на диаграмме, что можно объяснить двумя способами:

- В виду малой населённости верхней части диаграмм вероятно переоценка возраста звёзд выбранных областей;
- 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, за счёт чего наблюдается более молодой возраст;

Автор выражает искреннюю благодарность Фабрике С. Н. за руководство работой, Винокурову А. С. за всестороннюю помощь в выполнении работы и подготовке диссертации, Шолуховой О. Н. и Барсуковой Е. А. за ценные замечания к тексту диссертации, соавторам статей за сотрудничество, а также родным и друзьям за поддержку.

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] The Shape and Orientation of the Homunculus Nebula Based on Spectroscopic Velocities / Kris Davidson, Nathan Smith, Theodore R. Gull et al. // *AJ*. — 2001. — Mar. — Vol. 121, no. 3. — P. 1569–1577.
- [4] An Unusual Brightening Of Eta Carinae / Kris Davidson, Theodore R. Gull, Roberta M. Humphreys et al. // *AJ*. — 1999. — Oct. — Vol. 118, no. 4. — P. 1777–1783.
- [5] Constraining the absolute orientation of η Carinae's binary orbit: a 3D dynamical model for the broad [Fe III] emission / T. I. Madura, T. R. Gull, S. P. Owocki et al. // *MNRAS*. — 2012. — Mar. — Vol. 420, no. 3. — P. 2064–2086. — 1111.2226.
- [6] de Groot Mart. The most luminous stars in the universe // *Irish Astronomical Journal*. — 1988. — Mar. — Vol. 18. — P. 163–170.
- [7] de Groot Mart J. H., Lamers Henny J. G. L. M. Observation of gradual brightening of P Cygni due to stellar evolution // *Nature*. — 1992. — Jan. — Vol. 355, no. 6359. — P. 422–423.
- [8] 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.
- [9] Hubble E. P. A spiral nebula as a stellar system: Messier 33. // *ApJ*. — 1926. — May. — Vol. 63. — P. 236–274.

- [10] Hubble E. P. A spiral nebula as a stellar system, Messier 31. // *ApJ*. — 1929. — Mar. — Vol. 69. — P. 103–158.
- [11] Hubble Edwin, Sandage Allan. The Brightest Variable Stars in Extragalactic Nebulae. I. M31 and M33. // *ApJ*. — 1953. — Nov. — Vol. 118. — P. 353.
- [12] Humphreys R. M. Luminous variable stars in M31 and M33. // *ApJ*. — 1978. — Jan. — Vol. 219. — P. 445–451.
- [13] Conti P. S. Basic Observational Constraints on the Evolution of Massive Stars // *Observational Tests of the Stellar Evolution Theory* / Ed. by A. Maeder, A. Renzini. — Vol. 105 of IAU Symposium. — 1984. — Jan. — P. 233.
- [14] Richardson Noel D., Mehner Andrea. The 2018 Census of Luminous Blue Variables in the Local Group // *Research Notes of the American Astronomical Society*. — 2018. — Jul. — Vol. 2, no. 3. — P. 121. — 1807.04262.
- [15] Nebulae around Luminous Blue Variables: A Unified Picture / Antonella Nota, Mario Livio, Mark Clampin, Regina Schulte-Ladbeck // *ApJ*. — 1995. — Aug. — Vol. 448. — P. 788.
- [16] Weis Kerstin. LBV Nebulae: The Mass Lost from the Most Massive Stars // *Reviews in Modern Astronomy*. — 2001. — Jan. — Vol. 14. — P. 261. — astro-ph/0104214.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.

- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Spectroscopy of H α -emission blue stars in M33 / O. N. Sholukhova, S. N. Fabrika, V. V. Vlasyuk, A. N. Burenkov // Astronomy Letters. — 1997. — Jul. — Vol. 23, no. 4. — P. 458–464.
- [23] 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.
- [24] Neese C. L., Armandroff T. E., Massey P. H α Emission-Line Stars in M33 // Wolf-Rayet Stars and Interrelations with Other Massive Stars in Galaxies / Ed. by Karel A. van der Hucht, Bambang Hidayat. — Vol. 143 of IAU Symposium. — 1991. — Jan. — P. 651.
- [25] Corral L. J. LBV-Type Stars in M33 // AJ. — 1996. — Oct. — Vol. 112. — P. 1450.
- [26] Humphreys Roberta M., Massey Philip, Freedman Wendy L. Spectroscopy of Luminous Blue Stars in M31 and M33 // AJ. — 1990. — Jan. — Vol. 99. — P. 84.
- [27] Hot, Luminous Stars in Selected Regions of NGC 6822, M31, and M33 / Philip Massey, Taft E. Armandroff, Randall Pyke et al. // AJ. — 1995. — Dec. — Vol. 110. — P. 2715.
- [28] 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.

- [29] 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.
- [30] Humphreys Roberta M., Davidson Kris, Smith Nathan. η Carinae's Second Eruption and the Light Curves of the η Carinae Variables // *PASP*. — 1999. — Sep. — Vol. 111, no. 763. — P. 1124–1131.
- [31] van Genderen A. M. S Doradus variables in the Galaxy and the Magellanic Clouds // *A&A*. — 2001. — Feb. — Vol. 366. — P. 508–531.
- [32] ON THE NATURE OF THE PROTOTYPE LUMINOUS BLUE VARIABLE AG CARINAE. I. FUNDAMENTAL PARAMETERS DURING VISUAL MINIMUM PHASES AND CHANGES IN THE BOLOMETRIC LUMINOSITY DURING THE S-Dor CYCLE / J. H. Groh, D. J. Hillier, A. Damineli et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2009. — jun. — Vol. 698, no. 2. — P. 1698–1720. — URL: <https://doi.org/10.1088/0004-637x/698/2/1698>.
- [33] Bolometric luminosity variations in the luminous blue variable <ASTROBJ>AFGL2298</ASTROBJ> / J. S. Clark, P. A. Crowther, V. M. Lariionov et al. // *A&A*. — 2009. — Dec. — Vol. 507, no. 3. — P. 1555–1565. — 0909.4160.
- [34] Lamers H. J. G. L. M. Observations and Interpretation of Luminous Blue Variables // *IAU Colloq. 155: Astrophysical Applications of Stellar Pulsation* / Ed. by R. S. Stobie, P. A. Whitelock. — Vol. 83 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 1995. — Jan. — P. 176.
- [35] van Genderen A. M., Sterken C., de Groot M. New discoveries on the S DOR phenomenon based on an investigation of the photometric history of the variables AG Car, S Dor and η Car. // *A&A*. — 1997. — Feb. — Vol. 318. — P. 81–98.
- [36] An investigation of the micro-variations of highly luminous stars (alpha CYG variables). VI. The characteristics of the S DOR type stars R 71 and AG

- Car. / A. M. van Genderen, P. S. The, T. Augusteijn et al. // A&AS. — 1988. — Sep. — Vol. 74. — P. 453–466.
- [37] The massive wind of S Dor. / C. Leitherer, I. Appenzeller, G. Klare et al. // A&A. — 1985. — Dec. — Vol. 153. — P. 168–178.
- [38] Humphreys Roberta M., Davidson Kris. The Luminous Blue Variables: Astrophysical Geysers // PASP. — 1994. — Oct. — Vol. 106. — P. 1025.
- [39] Najarro F., Hillier D. J., Stahl O. A spectroscopic investigation of P Cygni. I. H and HeI lines. // A&A. — 1997. — Oct. — Vol. 326. — P. 1117–1134.
- [40] Clark J. S., Larionov V. M., Arkharov A. On the population of galactic Luminous Blue Variables // A&A. — 2005. — May. — Vol. 435, no. 1. — P. 239–246.
- [41] New luminous blue variables in the Andromeda galaxy / O. Sholukhova, D. Bizyaev, S. Fabrika et al. // MNRAS. — 2015. — Mar. — Vol. 447, no. 3. — P. 2459–2467. — 1412.5319.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] How Massive Single Stars End Their Life / A. Heger, C. L. Fryer, S. E. Woosley et al. // ApJ. — 2003. — Jul. — Vol. 591, no. 1. — P. 288–300. — astro-ph/0212469.
- [45] Meynet G., Maeder A. Stellar evolution with rotation. X. Wolf-Rayet star populations at solar metallicity // A&A. — 2003. — Jun. — Vol. 404. — P. 975–990. — astro-ph/0304069.
- [46] Red Supergiants, Luminous Blue Variables and Wolf-Rayet stars: the single massive star perspective / Georges Meynet, Cyril Georgy, Raphael Hirschi

- et al. // Bulletin de la Societe Royale des Sciences de Liege. — 2011. — Jan. — Vol. 80. — P. 266–278. — 1101.5873.
- [47] Conti P. S. On the relationship between Of and WR stars. // Memoires of the Societe Royale des Sciences de Liege. — 1975. — Jan. — Vol. 9. — P. 193–212.
- [48] Crowther Paul A. Physical Properties of Wolf-Rayet Stars // ARA&A. — 2007. — Sep. — Vol. 45, no. 1. — P. 177–219. — astro-ph/0610356.
- [49] Gal-Yam A., Leonard D. C. A massive hypergiant star as the progenitor of the supernova SN 2005gl // Nature. — 2009. — Apr. — Vol. 458, no. 7240. — P. 865–867.
- [50] Kotak R., Vink J. S. Luminous blue variables as the progenitors of supernovae with quasi-periodic radio modulations // A&A. — 2006. — Dec. — Vol. 460, no. 2. — P. L5–L8. — astro-ph/0610095.
- [51] SN 2005 gj: evidence for LBV supernovae progenitors? / C. Trundle, R. Kotak, J. S. Vink, W. P. S. Meikle // A&A. — 2008. — Jun. — Vol. 483, no. 3. — P. L47–L50. — 0804.2392.
- [52] 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.
- [53] Humphreys R. M., Davidson K. Studies of luminous stars in nearby galaxies. III. Comments on the evolution of the most massive stars in the Milky Way and the Large Magellanic Cloud. // ApJ. — 1979. — Sep. — Vol. 232. — P. 409–420.
- [54] Luminous and Variable Stars in M31 and M33. V. The Upper HR Diagram / Roberta M. Humphreys, Kris Davidson, David Hahn et al. // ApJ. — 2017. — Jul. — Vol. 844, no. 1. — P. 40. — 1707.01916.
- [55] Vink Jorick S. Eta Carinae and the Luminous Blue Variables // Eta Carinae and the Supernova Impostors / Ed. by Kris Davidson, Roberta M. Humphreys. — 2012. — Vol. 384 of Astrophysics and Space Science Library. — P. 221.

- [56] Meynet G., Maeder A. Stellar evolution with rotation. XI. Wolf-Rayet star populations at different metallicities // *A&A.* — 2005. — Jan. — Vol. 429. — P. 581–598. — astro-ph/0408319.
- [57] Grids of stellar models with rotation. I. Models from 0.8 to 120 M at solar metallicity ($Z = 0.014$) / S. Ekström, C. Georgy, P. Eggenberger et al. // *A&A.* — 2012. — Jan. — Vol. 537. — P. A146. — 1110.5049.
- [58] Klochkova V. G. Unity and Diversity of Yellow Hypergiants Family // *Astrophysical Bulletin.* — 2019. — Dec. — Vol. 74, no. 4. — P. 475–489. — 1911.09387.
- [59] Ledoux P. On the Vibrational Stability of Gaseous Stars. // *ApJ.* — 1941. — Nov. — Vol. 94. — P. 537.
- [60] Schwarzschild M., Härm R. On the Maximum Mass of Stable Stars. // *ApJ.* — 1959. — May. — Vol. 129. — P. 637.
- [61] Stothers Richard B. Upper Limit to the Mass of Pulsationally Stable Stars with Uniform Chemical Composition // *ApJ.* — 1992. — Jun. — Vol. 392. — P. 706.
- [62] Humphreys R. M., Davidson K. The Most Luminous Stars // *Science.* — 1984. — Jan. — Vol. 223, no. 4633. — P. 243–249.
- [63] Appenzeller I. Instability in massive stars - an overview // *Luminous Stars and Associations in Galaxies* / Ed. by C. W. H. De Loore, A. J. Willis, P. Laskarides. — Vol. 116 of IAU Symposium. — 1986. — Jan. — P. 139–148.
- [64] Appenzeller I. The Role of Radiation Pressure in LBV Atmospheres // *IAU Colloq. 113: Physics of Luminous Blue Variables* / Ed. by Kris Davidson, A. F. J. Moffat, H. J. G. L. M. Lamers. — 1989. — Vol. 157 of *Astrophysics and Space Science Library.* — P. 195.
- [65] de Jager C. The stability limit of hypergiant photospheres. // *A&A.* — 1984. — Sep. — Vol. 138. — P. 246–252.

- [66] Stothers Richard B., Chin Chao-Wen. Dynamical Instability as the Cause of the Massive Outbursts in eta Carinae and Other Luminous Blue Variables // *ApJ*. — 1993. — May. — Vol. 408. — P. L85.
- [67] Glatzel W., Kiriakidis M. Stability of Massive Stars and the Humphreys / Davidson Limit // *MNRAS*. — 1993. — Jul. — Vol. 263. — P. 375.
- [68] Moskalik P., Dziembowski W. A. New opacities and the origin of the β Cephei pulsation. // *A&A*. — 1992. — Mar. — Vol. 256. — P. L5–L8.
- [69] Lefever K., Puls J., Aerts C. Statistical properties of a sample of periodically variable B-type supergiants. Evidence for opacity-driven gravity-mode oscillations // *A&A*. — 2007. — Mar. — Vol. 463, no. 3. — P. 1093–1109. — astro-ph/0611484.
- [70] Bona Fide, Strong-Variable Galactic Luminous Blue Variable Stars are Fast Rotators: Detection of a High Rotational Velocity in HR Carinae / J. H. Groh, A. Damineli, D. J. Hillier et al. // *ApJ*. — 2009. — Nov. — Vol. 705, no. 1. — P. L25–L30. — 0909.4459.
- [71] SN 1997bs in M66: Another Extragalactic η Carinae Analog? / Schuyler D. Van Dyk, Chien Y. Peng, Jennifer Y. King et al. // *PASP*. — 2000. — Dec. — Vol. 112, no. 778. — P. 1532–1541. — astro-ph/0009027.
- [72] Humphreys R. M., Davidson K. Studies of luminous stars in nearby galaxies. III. Comments on the evolution of the most massive stars in the Milky Way and the Large Magellanic Cloud. // *ApJ*. — 1979. — Sep. — Vol. 232. — P. 409–420.
- [73] Kochanek C. S., Szczygieł D. M., Stanek K. Z. Unmasking the Supernova Impostors // *ApJ*. — 2012. — Oct. — Vol. 758, no. 2. — P. 142. — 1202.0281.
- [74] Absolute-magnitude Distributions of Supernovae / Dean Richardson, III Jenkins, Robert L., John Wright, Larry Maddox // *AJ*. — 2014. — May. — Vol. 147, no. 5. — P. 118. — 1403.5755.

- [75] A Tale of Two Impostors: SN2002kg and SN1954J in NGC 2403 / Roberta M. Humphreys, Kris Davidson, Schuyler D. Van Dyk, Michael S. Gordon // *ApJ*. — 2017. — Oct. — Vol. 848, no. 2. — P. 86. — 1709.01528.
- [76] Kochanek C. S., Szczygiel D. M., Stanek K. Z. The Supernova Impostor Impostor SN 1961V: Spitzer Shows That Zwicky Was Right (Again) // *ApJ*. — 2011. — Aug. — Vol. 737, no. 2. — P. 76. — 1010.3704.
- [77] Supernova 1954J (Variable 12) in NGC 2403 Unmasked / Schuyler D. Van Dyk, Alexei V. Filippenko, Ryan Chornock et al. // *PASP*. — 2005. — Jun. — Vol. 117, no. 832. — P. 553–562. — astro-ph/0503324.
- [78] Weis Kerstin, Bomans Dominik J. Luminous Blue Variables // *Galaxies*. — 2020. — Feb. — Vol. 8, no. 1. — P. 20.
- [79] Pastorello Andrea, Fraser Morgan. Supernova impostors and other gap transients // *Nature Astronomy*. — 2019. — Aug. — Vol. 3. — P. 676–679. — 1908.02323.
- [80] Kraus Michaela. A Census of B[e] Supergiants // *Galaxies*. — 2019. — Sep. — Vol. 7, no. 4. — P. 83. — 1909.12199.
- [81] An improved classification of B[e]-type stars / Henny J. G. L. M. Lamers, Franz-Josef Zickgraf, Dolf de Winter et al. // *A&A*. — 1998. — Dec. — Vol. 340. — P. 117–128.
- [82] Feast M. W., Thackeray A. D., Wesselink A. J. The brightest stars in the Magellanic Clouds // *MNRAS*. — 1960. — Jan. — Vol. 121. — P. 337.
- [83] The hybrid spectrum of the LMC hypergiant R 126. / F. J. Zickgraf, B. Wolf, O. Stahl et al. // *A&A*. — 1985. — Feb. — Vol. 143. — P. 421–430.
- [84] Three new hot stars with dust shells in the Magellanic clouds. / O. Stahl, C. Leitherer, B. Wolf, F. J. Zickgraf // *A&A*. — 1984. — Feb. — Vol. 131. — P. L5–L6.

- [85] R66 (Aeq), an LMC B Supergiant with a Massive, Cool and Dusty Wind / O. Stahl, B. Wolf, F. J. Zickgraf et al. // *A&A.* — 1983. — Apr. — Vol. 120. — P. 287–296.
- [86] Spitzer SAGE Infrared Photometry of Massive Stars in the Large Magellanic Cloud / A. Z. Bonanos, D. L. Massa, M. Sewilo et al. // *AJ.* — 2009. — Oct. — Vol. 138, no. 4. — P. 1003–1021. — 0905.1328.
- [87] A new observational tracer for high-density disc-like structures around B[e] supergiants / A. Aret, M. Kraus, M. F. Muratore, M. Borges Fernandes // *MNRAS.* — 2012. — Jun. — Vol. 423, no. 1. — P. 284–293. — 1203.6808.
- [88] Luminous and Variable Stars in M31 and M33. I. The Warm Hypergiants and Post-red Supergiant Evolution / Roberta M. Humphreys, Kris Davidson, Skyler Grammer et al. // *ApJ.* — 2013. — Aug. — Vol. 773, no. 1. — P. 46. — 1305.6051.
- [89] van Genderen A. M., Sterken C. Light variations of massive stars (alpha Cyg variables). XVIII. The B[e] supergiants S 18 in the SMC and R 66 = HDE 268835 and R 126 = HD 37974 in the LMC // *A&A.* — 2002. — May. — Vol. 386. — P. 926–935.
- [90] A Survey of Local Group Galaxies Currently Forming Stars. III. A Search for Luminous Blue Variables and Other H α Emission-Line Stars / Philip Massey, Reagin T. McNeill, K. A. G. Olsen et al. // *AJ.* — 2007. — Dec. — Vol. 134, no. 6. — P. 2474–2503. — 0709.1267.
- [91] Walborn N. R. Spectral classification of O and B0 supergiants in the Magellanic Clouds. // *ApJ.* — 1977. — Jul. — Vol. 215. — P. 53–61.
- [92] R 127 : an S DOR type variable intermediate between Of and WN. / O. Stahl, B. Wolf, G. Klare et al. // *A&A.* — 1983. — Nov. — Vol. 127. — P. 49–62.
- [93] Stahl O. The relationship of the variable stars AG Car and HDE 269582 to the Ofpe/WN9 objects. // *A&A.* — 1986. — Aug. — Vol. 164. — P. 321–327.

- [94] Walborn Nolan R., Fitzpatrick Edward L. The OB Zoo: A Digital Atlas of Peculiar Spectra // PASP. — 2000. — Jan. — Vol. 112, no. 767. — P. 50–64.
- [95] Luminous and Variable Stars in M31 and M33. IV. Luminous Blue Variables, Candidate LBVs, B[e] Supergiants, and the Warm Hypergiants: How to Tell Them Apart / Roberta M. Humphreys, Michael S. Gordon, John C. Martin et al. // ApJ. — 2017. — Feb. — Vol. 836, no. 1. — P. 64. — 1611.07986.
- [96] 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.
- [97] 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.
- [98] 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.
- [99] 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.
- [100] 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.
- [101] Afanasiev V. L., Moiseev A. V. The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope // Astronomy Letters. — 2005. — Mar. — Vol. 31, no. 3. — P. 194–204. — astro-ph/0502095.
- [102] Buckley David A. H., Swart Gerhard P., Meiring Jacobus G. Completion and commissioning of the Southern African Large Telescope // Proc. SPIE. — Vol. 6267 of

- Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — 2006. — Jun. — P. 62670Z.
- [103] First science with the Southern African Large Telescope: peering at the accreting polar caps of the eclipsing polar SDSS J015543.40+002807.2 / D. O’Donoghue, D. A. H. Buckley, L. A. Balona et al. // MNRAS. — 2006. — Oct. — Vol. 372, no. 1. — P. 151–162. — astro-ph/0607266.
- [104] Prime Focus Imaging Spectrograph for the Southern African Large Telescope: optical design / Eric B. Burgh, Kenneth H. Nordsieck, Henry A. Kobulnicky et al. // Proc. SPIE / Ed. by Masanori Iye, Alan F. M. Moorwood. — Vol. 4841 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — 2003. — Mar. — P. 1463–1471.
- [105] Prime focus imaging spectrograph for the Southern African large telescope: operational modes / Henry A. Kobulnicky, Kenneth H. Nordsieck, Eric B. Burgh et al. // Proc. SPIE / Ed. by Masanori Iye, Alan F. M. Moorwood. — Vol. 4841 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — 2003. — Mar. — P. 1634–1644.
- [106] Richter O. G., Rosa M. R. A Wolf-Rayet Cluster in IC 4662 // Wolf-Rayet Stars and Interrelations with Other Massive Stars in Galaxies / Ed. by Karel A. van der Hucht, Bambang Hidayat. — Vol. 143. — 1991. — Jan. — P. 653.
- [107] Hadfield L. J., Crowther P. A. How extreme are the Wolf-Rayet clusters in NGC3125? // MNRAS. — 2006. — Jun. — Vol. 368, no. 4. — P. 1822–1832. — astro-ph/0602591.
- [108] Cosmicflows-2: The Data / R. Brent Tully, Hélène M. Courtois, Andrew E. Dolphin et al. // AJ. — 2013. — Oct. — Vol. 146, no. 4. — P. 86. — 1307.7213.
- [109] New luminous blue variable candidates in NGC 4736 / Y. Solovyeva, A. Vinokurov, S. Fabrika et al. // MNRAS. — 2019. — Mar. — Vol. 484, no. 1. — P. L24–L28. — 1901.05277.

- [110] Afanasiev V. L., Moiseev A. V. Scorpio on the 6 m Telescope: Current State and Perspectives for Spectroscopy of Galactic and Extragalactic Objects // *Baltic Astronomy*. — 2011. — Aug. — Vol. 20. — P. 363–370. — 1106.2020.
- [111] FOCAS: faint object camera and spectrograph for the Subaru Telescope / Nobunari Kashikawa, Motoko Inata, Masanori Iye et al. // *Proc. SPIE* / Ed. by Masanori Iye, Alan F. Moorwood. — Vol. 4008 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — 2000. — Aug. — P. 104–113.
- [112] SPEXTRA: Optimal extraction code for long-slit spectra in crowded fields / A. N. Sarkisyan, A. S. Vinokurov, Yu. N. Solovieva et al. // *Astrophysical Bulletin*. — 2017. — Oct. — Vol. 72, no. 4. — P. 486–501.
- [113] Crawford S. M., Still M., Schellart P. et al. PySALT: SALT science pipeline. — 2012. — Jul. — 1207.010.
- [114] Dolphin Andrew E. WFPC2 Stellar Photometry with HSTPHOT // *PASP*. — 2000. — Oct. — Vol. 112, no. 776. — P. 1383–1396. — astro-ph/0006217.
- [115] Dolphin Andrew. DOLPHOT: Stellar photometry. — 2016. — Aug. — 1608.013.
- [116] The Photometric Performance and Calibration of the Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys / M. Sirianni, M. J. Jee, N. Benítez et al. // *PASP*. — 2005. — Oct. — Vol. 117, no. 836. — P. 1049–1112. — astro-ph/0507614.
- [117] Harris William E. Transformation of HST WFC3/UVIS Filters to the Standard BVI System // *AJ*. — 2018. — Dec. — Vol. 156, no. 6. — P. 296.
- [118] Anderson Jay, King Ivan R. PSFs, Photometry, and Astronomy for the ACS/WFC. — Instrument Science Report ACS 2006-01. — 2006. — Feb.
- [119] Stetson Peter B. DAOPHOT: A Computer Program for Crowded-Field Stellar Photometry // *PASP*. — 1987. — Mar. — Vol. 99. — P. 191.

- [120] Spitzer Point-source Catalogs of $\sim 300,000$ Stars in Seven Nearby Galaxies / Rubab Khan, K. Z. Stanek, C. S. Kochanek, G. Sonneborn // *ApJS*. — 2015. — Aug. — Vol. 219, no. 2. — P. 42. — 1504.01744.
- [121] The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey / Kevork N. Abazajian, Jennifer K. Adelman-McCarthy, Marcel A. Agüeros et al. // *ApJS*. — 2009. — Jun. — Vol. 182, no. 2. — P. 543–558. — 0812.0649.
- [122] A Long-term Photometric Variability and Spectroscopic Study of Luminous Blue Variable AF And in M31 / Yogesh C. Joshi, Kaushal Sharma, Anjasha Gangopadhyay et al. // *AJ*. — 2019. — Nov. — Vol. 158, no. 5. — P. 175. — 1908.01893.
- [123] Osterbrock D. E., Ferland G. J. Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei. — 2006.
- [124] Forbidden emission lines in the spectrum of P Cygni. / O. Stahl, H. Mandel, Th. Szeifert et al. // *A&A*. — 1991. — Apr. — Vol. 244. — P. 467.
- [125] Crowther P. A., Hillier D. J., Smith L. J. Fundamental parameters of Wolf-Rayet stars. I. Ofpe/WN9 stars. // *A&A*. — 1995. — Jan. — Vol. 293. — P. 172–197.
- [126] Fitzgerald M. Pim. The Intrinsic Colours of Stars and Two-Colour Reddening Lines // *A&A*. — 1970. — Feb. — Vol. 4. — P. 234.
- [127] Straizys V., Kuriliene G. Fundamental Stellar Parameters Derived from the Evolutionary Tracks // *Ap&SS*. — 1981. — Dec. — Vol. 80, no. 2. — P. 353–368.
- [128] Millimeter emission of η Carinae and its surroundings. / P. Cox, P. G. Mezger, A. Sievers et al. // *A&A*. — 1995. — May. — Vol. 297. — P. 168–174.
- [129] Fitzpatrick Edward L. Correcting for the Effects of Interstellar Extinction // *PASP*. — 1999. — Jan. — Vol. 111, no. 755. — P. 63–75. — astro-ph/9809387.
- [130] Luminous blue variable candidates in M31 / A. Sarkisyan, O. Sholukhova, S. Fabrika et al. // *MNRAS*. — 2020. — Sep. — Vol. 497, no. 1. — P. 687–697. — 2008.12240.

- [131] The hybrid spectrum of the LMC hypergiant R 126. / F. J. Zickgraf, B. Wolf, O. Stahl et al. // *A&A*. — 1985. — Feb. — Vol. 143. — P. 421–430.
- [132] B(e)-supergiants of the Magellanic Clouds. / F. J. Zickgraf, B. Wolf, O. Stahl et al. // *A&A*. — 1986. — Jul. — Vol. 163. — P. 119–134.
- [133] CHIANTI - an atomic database for emission lines / K. P. Dere, E. Landi, H. E. Mason et al. // *A&AS*. — 1997. — Oct. — Vol. 125. — P. 149–173.
- [134] CHIANTI—An Atomic Database for Emission Lines. XIII. Soft X-Ray Improvements and Other Changes / E. Landi, P. R. Young, K. P. Dere et al. // *ApJ*. — 2013. — Feb. — Vol. 763, no. 2. — P. 86.
- [135] Davidson Kris, Humphreys Roberta M. Eta Carinae and Its Environment // *ARA&A*. — 1997. — Jan. — Vol. 35. — P. 1–32.
- [136] Hillier D. J. An iterative method for the solution of the statistical and radiative equilibrium equations in expanding atmospheres. // *A&A*. — 1990. — May. — Vol. 231. — P. 116–124.
- [137] Hillier D. J. WC Stars: Hot Stars with Cold Winds // *ApJ*. — 1989. — Dec. — Vol. 347. — P. 392.
- [138] The ISO-SWS spectrum of P Cygni. / H. J. G. L. M. Lamers, F. Najarro, R. P. Kudritzki et al. // *A&A*. — 1996. — Nov. — Vol. 315. — P. L229–L232.
- [139] Hillier D. John, Miller D. L. Constraints on the Evolution of Massive Stars through Spectral Analysis. I. The WC5 Star HD 165763 // *ApJ*. — 1999. — Jul. — Vol. 519, no. 1. — P. 354–371.
- [140] Planetary Nebulae and H II Regions in the Starburst Irregular Galaxy NGC 4449 from LBT MODS Data / F. Annibali, M. Tosi, D. Romano et al. // *ApJ*. — 2017. — Jul. — Vol. 843, no. 1. — P. 20. — 1706.02108.
- [141] High-resolution spectroscopy of two LBV cycles of HR Car / Thomas Szeifert, Andreas Kaufer, Paul A. Crowther et al. // *A Massive Star Odyssey: From*

- Main Sequence to Supernova / Ed. by Karel van der Hucht, Artemio Her-
 rero, César Esteban. — Vol. 212 of International Astronomical Union Sympo-
 sium. — 2003. — Jan. — P. 243.
- [142] Long-term spectroscopic monitoring of the Luminous Blue Variable AG Cari-
 nae / O. Stahl, I. Jankovics, J. Kovács et al. // *A&A*. — 2001. — Aug. — Vol.
 375. — P. 54–69.
- [143] The Wind of Variable C in M33 / Roberta M. Humphreys, Kris David-
 son, Michael S. Gordon et al. // *ApJ*. — 2014. — Feb. — Vol. 782, no. 2. —
 P. L21. — 1401.5487.
- [144] On the influence of the companion star in Eta Carinae: 2D radiative transfer
 modelling of the ultraviolet and optical spectra / Jose H. Groh, D. John Hillier,
 Thomas I. Madura, Gerd Weigelt // *MNRAS*. — 2012. — Jun. — Vol. 423,
 no. 2. — P. 1623–1640. — 1204.1963.
- [145] On the Nature of the Central Source in η Carinae / D. John Hillier, K. David-
 son, K. Ishibashi, T. Gull // *ApJ*. — 2001. — Jun. — Vol. 553, no. 2. — P. 837–
 860.
- [146] New PARSEC evolutionary tracks of massive stars at low metallicity: testing
 canonical stellar evolution in nearby star-forming dwarf galaxies / Jing Tang,
 Alessandro Bressan, Philip Rosenfield et al. // *MNRAS*. — 2014. — Dec. — Vol.
 445, no. 4. — P. 4287–4305. — 1410.1745.
- [147] Pilyugin L. S., Grebel E. K., Kniazev A. Y. The Abundance Properties of
 Nearby Late-type Galaxies. I. The Data // *AJ*. — 2014. — Jun. — Vol. 147,
 no. 6. — P. 131. — 1403.5461.
- [148] The void in the Sculptor group spiral galaxy NGC 247 / R. Wagner-Kaiser,
 T. De Maio, A. Sarajedini, S. Chakrabarti // *MNRAS*. — 2014. — Oct. — Vol.
 443, no. 4. — P. 3260–3269. — 1407.0584.
- [149] Rodríguez M. J., Baume G., Feinstein C. The young stellar population in NGC
 247. Main properties and hierarchical clustering // *A&A*. — 2019. — Jun. —
 Vol. 626. — P. A35. — 1904.09926.

- [150] Davidge T. J. The Disk and Extraplanar Environment of NGC 247 // *ApJ*. — 2006. — Apr. — Vol. 641, no. 2. — P. 822–837. — astro-ph/0603331.
- [151] 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.
- [152] Smith Nathan. The isolation of luminous blue variables: on subdividing the sample // *MNRAS*. — 2016. — Sep. — Vol. 461, no. 3. — P. 3353–3360. — 1607.01054.
- [153] The Araucaria Project: The Distance to the Sculptor Galaxy NGC 247 from Near-Infrared Photometry of Cepheid Variables / Wolfgang Gieren, Grzegorz Pietrzyński, Igor Soszyński et al. // *ApJ*. — 2009. — Aug. — Vol. 700, no. 2. — P. 1141–1147. — 0905.2699.
- [154] A New Generation of PARSEC-COLIBRI Stellar Isochrones Including the TP-AGB Phase / Paola Marigo, Léo Girardi, Alessandro Bressan et al. // *ApJ*. — 2017. — Jan. — Vol. 835, no. 1. — P. 77. — 1701.08510.
- [155] Kroupa Pavel. On the variation of the initial mass function // *MNRAS*. — 2001. — Apr. — Vol. 322, no. 2. — P. 231–246. — astro-ph/0009005.
- [156] Kroupa Pavel. The Initial Mass Function of Stars: Evidence for Uniformity in Variable Systems // *Science*. — 2002. — Jan. — Vol. 295, no. 5552. — P. 82–91. — astro-ph/0201098.
- [157] Discrepancies in the ages of young star clusters; evidence for mergers? / Emma R. Beasor, Ben Davies, Nathan Smith, Nate Bastian // *MNRAS*. — 2019. — Jun. — Vol. 486, no. 1. — P. 266–273. — 1903.05106.
- [158] Ultraviolet Imaging of the Irregular Galaxy NGC 4449 with the Ultraviolet Imaging Telescope: Photometry and Recent Star Formation History / Robert S. Hill, Michael N. Fanelli, Denise A. Smith et al. // *ApJ*. — 1998. — Nov. — Vol. 507, no. 1. — P. 179–198. — astro-ph/9808039.