

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Ярлова Анастасия Дмитриевна

**Исследование взаимодействия массивных звезд и
межзвездной среды в близких низкометаллических
галактиках**

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Диссертация на соискание учёной степени

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Моисеев Алексей Валерьевич

Москва — 2025

Оглавление

	Стр.
Введение	5
Глава 1. Наблюдательные данные и методы, используемые в работе	19
1.1 Наблюдательные данные	19
1.1.1 Длиннощелевая спектроскопия	19
1.1.2 Данные 3D-спектроскопии	21
1.1.3 Фотометрические данные	22
1.1.4 Данные многоволновой астрономии	24
1.2 Методы анализа ионизованного газа в галактиках	26
1.2.1 Анализ кинематики МЗС галактик с помощью данных интерферометрии Фабри-Перро	26
1.2.2 Диагностические BPT-диаграммы	27
1.2.3 Методы оценки параметров межзвездной среды галактик	28
1.2.4 Оценка энергетического баланса между O-звездами и МЗС	29
Глава 2. Определение природы пекулярной туманности в галактике NGC 4068	31
2.1 Свойства объекта #A, определяемые из наблюдений	34
2.1.1 Наблюдательные свойства изучаемой туманности	34
2.1.2 Свойства источника, ионизирующего туманность	36
2.2 Возможные объяснения наблюдательных свойств объекта #A	42
2.3 Моделирование наблюдаемой туманности	44
2.3.1 Моделирование спектра звезды, ионизирующей туманность	44
2.3.2 Модели туманности, полученные с помощью кода CLOUDY	49
2.4 Результаты моделирования	50
2.4.1 Критерий отбора моделей	50
2.5 Выбор наилучшей модели	51
2.5.1 Параметры модели, демонстрирующей наилучшее согласие с наблюдениями	52

2.6	Природа ионизации туманности согласно построенным моделям .	55
2.7	Основные выводы главы	57
Глава 3. Взаимодействие массивных звезд с межзвездной		
	средой в карликовой галактике IC 1613	58
3.1	Слабые оболочки ионизованного газа, обнаруженные в линии H α	58
3.1.1	Состояние ионизованного газа	62
3.1.2	Ионизационный баланс между излучением H α -оболочек и массивных звезд	66
3.1.3	Кандидаты в остатки сверхновых	68
3.2	Кандидаты в звезды WR в галактике IC 1613	69
3.2.1	Кандидаты в звезды WR на карте He II	69
3.2.2	Поиск кандидатов в звезды WR в спектральных данных MUSE/VLT	73
3.3	Звезды с эмиссионной компонентой H α в данных MUSE/VLT . .	75
3.4	Основные выводы главы	78
Глава 4. Металличность и мелкомасштабная кинематика		
	ионизованного газа в близкой галактике с активным	
	звездообразованием NGC 2366	80
4.1	Анализ областей H II в галактике NGC 2366	81
4.1.1	выделение областей H II в галактике	81
4.1.2	Мелкомасштабная кинематика ионизованного газа	84
4.1.3	Состояние ионизации эмиссионных областей	89
4.1.4	Металличность ионизованного газа	93
4.2	Результаты и обсуждение	97
4.2.1	Исследование кандидатов в звезды WR и остатки сверхновых	97
4.2.2	Химический состав областей H II	101
4.2.3	Кинематические свойства области Mrk 71 и связанного с ней истечения ионизованного газа	105
4.3	Основные выводы главы	106
Заключение		108
Благодарности		112

Список литературы	113
Список рисунков	132
Список таблиц	143

Введение

Актуальность, история и степень разработанности темы

Взаимодействие массивных звёзд ($M > 8M_{\odot}$) с межзвёздной средой (МЗС) играет ключевую роль во многих процессах, происходящих в галактиках, значительно влияя на их морфологию, кинематику и химическую эволюцию [1–3]. Теоретические представления о влиянии горячих звёзд на окружающий межзвёздный газ были предложены ещё в работе Струве 1939 года [4], в которой он описал образование ионизованных областей водорода вокруг О-звёзд. Массивные звезды оказывают многоступенчатое воздействие на окружающее вещество, начиная с Главной Последовательности (ГП) и вплоть до конечных стадий их эволюции, которые при этом могут значительно различаться в зависимости от начальных параметров звезды. На ранних этапах эволюции звезд наиболее значимым фактором их воздействия на МЗС является ультрафиолетовое излучение (УФ, с длиной волны менее $912\text{\AA}$), обусловленное высокими температурами звезд (более 20кК , [5]), ионизирующее межзвездный газ. Одновременно с этим массивные звезды порождают звездный ветер, способный механически разогнать окружающий газ (для звезд О3-О9 на ГП темп потери массы и терминальная скорость имеют значения $\dot{M} = 10^{-7} - 10^{-5.6} M_{\odot}/\text{год}$, $v_{\infty} = 2500 - 3500 \text{ км/с}$, [6]). В результате совместного действия ультрафиолетового излучения и звездных ветров вокруг массивных звезд формируются протяжённые области ионизованного водорода (далее – области H II, [7]).

После схода массивных звезд с ГП, звезда может проходить разные фазы – Красный Супергигант (RSG), Голубой Супергигант (BSG), Желтый Гипергигант (YHG), звезда Вольфа-Райе (WR), Яркая Голубая Переменная (LBV) [8–11]. Классический сценарий эволюции массивных звёзд был предложен Конти в 1976 году. В своей работе он показал возможную эволюционную связь между звёздами типа О и звёздами Вольфа-Райе (WR), подчеркнув при этом решающую роль потери массы в звездной эволюции [12]. Позже было показано, что последовательность эволюционных стадий сильно зависит от начальной массы и показателя металличности, а также от наличия второго компонента. При этом температуры звезд в разные моменты эволюции могут варьироваться от

4кК до нескольких сотен кК (последнее – в случае некоторых звезд WR [5]). Влияние ветров массивной звезды на МЗС после схода с ГП усиливается. Так, темп потери массы звезды на стадии WR при солнечной металличности может достигать значения $\dot{M} = 10^{-4.2} M_{\odot}/\text{год}$ [13]. Поэтому влияние проэволюционировавших массивных звезд на МЗС необходимо учитывать при моделировании процессов звездообразования и построении реалистичных сценариев эволюции галактик. Благодаря воздействию массивной звезды на окружающий газ до взрыва сверхновой снижается плотность околозвездного газа, отчего начало радиативных потерь в остатке сверхновой происходит позже [3]. При этом звездные ветры создают полости размером в десятки парсек внутри областей H II [14].

Завершающей стадией эволюции массивных звезд становится взрыв сверхновой, сопровождаемый выбросом в МЗС колоссального количества энергии и тяжёлых элементов, формирующих расширяющуюся оболочку с ударной волной, сгребаящую окружающий газ и способную оказывать на него влияние на временных масштабах в сотни тысяч лет [15]. Все эти процессы приводят к формированию сложных структур в МЗС родительской галактики — пузырей, оболочек, фронтов ударных волн и конусов утечки ионизирующего излучения. Описанные процессы могут играть стимулирующую роль в последующем звездообразовании. Например, в работах [16; 17] показано, что коллективное действие нескольких поколений O-звезд приводит к образованию газовых оболочек, достигающих нескольких килопарсек в диаметре и вторичному звездообразованию их стенках. Кроме того, совместная деятельность массивных звезд может приводить к образованию галактических ветров [18; 19] и выбросу газа, обогащенного тяжёлыми элементами, из дисков галактик в окружающую среду — окологалактическую и межгалактическую [1].

Особый интерес в контексте исследований взаимодействия массивных звезд с окружением представляют звезды с низким содержанием металлов, для которых как теоретические, так и наблюдательные исследования предсказывают изменение эволюционного пути и основных параметров. Так, в работах [20; 21] показана сильная зависимость темпа потери массы O- и B-звезд от показателя металличности: темп потери массы уменьшается с уменьшением показателя металличности. Уменьшение скорости потери массы при низкой металличности, в свою очередь, приводит к увеличению остаточной массы и углового

момента звезды, поэтому бедные металлами звезды вращаются быстрее высокометаллических (см. [22; 23]). Быстрое вращение приводит в свою очередь к тому, что низкометаллические звезды позже сходят с главной последовательности [24]. Кроме того, быстрое вращение звезды приводит к более эффективному перемешиванию вещества внутри нее [24]. В совокупности все эти факторы приводят к изменению в работе обратной связи между звездами и МЗС.

Теоретические представления разных научных групп об эволюции массивных звезд с солнечной металличностью в основном сходятся, в условиях же пониженной металличности такого согласия в настоящий момент нет. Так, например, для звёзд с начальными массами свыше $40M_{\odot}$ эволюционные треки, полученные разными авторами, могут существенно различаться (хорошей иллюстрацией является расхождение в работах [24–27]). В отсутствие достаточных наблюдательных данных, модели массивных звезд опираются на разнообразные предположения и, как результат, предсказывают значения ключевых параметров, значительно отличающиеся друг от друга (например верхнее ограничение на возможную массу звезды, скорость ветра, скорость вращения, темп потери массы). Все эти противоречия приводят к расхождению сценариев эволюции звезд, и, в итоге, к пробелам в представлениях об эволюции газовой среды галактик с пониженной металличностью (в том числе, галактик в ранней Вселенной).

Получение наблюдательных данных о проэволюционировавших массивных звездах при низкой металличности сопряжено со значительными трудностями, так как эти объекты редки и находятся вне Млечного Пути (МП). Многие работы посвящены поиску и анализу массивных проэволюционировавших звезд в Большом и Малом Магеллановых Облаках (БМО, ММО), находящихся сравнительно недалеко от МП. Однако металличность Магеллановых облаков ($12 + \log(\text{O}/\text{H}) \sim 8.4$ для БМО и ~ 8.0 для ММО по оценкам из [28]) недостаточно низка для полноценной проверки моделей звездной эволюции, и зачастую требуются данные для более низких содержаний тяжелых элементов. При этом выборка массивных звезд на ранних эволюционных стадиях в условиях металличности, более низкой, чем в SMC, на сегодняшний день критически мала (подробно эта проблема освещена, например, в [5]).

Изучение наиболее низкометаллических массивных звезд особенно важно в контексте эволюции ранней Вселенной. Первые звезды (поколение III) были от-

ветственны за реионизацию Вселенной и химическое обогащение ранних галактик. При этом моделирование показывает, что первые звезды могут иметь существенно другие параметры, чем близкие наблюдаемые звезды, а также другое распределение по массам (см., например [29—31]). И хотя в настоящий момент поиски звезд поколения III не привели к их обнаружению [32], поиск массивных звезд, образовавшихся в условиях как можно более низкой металличности может выявить тренды в их эволюционных путях, структуре и механизмах потери массы, что необходимо для построения моделей, которые могли бы приблизить нас к пониманию устройства самых первых звёзд с нулевой металличностью, а также проливают свет на процессы, характерные для ранних этапов химической эволюции Вселенной [5; 33].

Особенно мало наблюдательных данных получено о короткоживущих эволюционных стадиях массивных звезд в условиях низкой металличности: например, о звездах LBV и низкометаллических WR. На сегодняшний день только несколько десятков кандидатов в LBV являются подтвержденными, и большая их часть находится в нашей галактике и в галактиках Местной Группы ([34]). Таким образом, каждый новый найденный кандидат в низкометаллическую звезду LBV представляет большой интерес в контексте звездной эволюции. Несмотря на то, что звезды WR являются более многочисленными, чем LBV, (~ 700 WR звезд известно в Млечном Пути [35], еще ~ 150 и ~ 200 в условиях высокой металличности известны в галактиках M31 и M33 [36], ~ 150 WR звезд в LMC [37], 12 в SMC [38]), они представляют большой наблюдательный интерес в контексте настоящей работы в связи со значительным воздействием на МЗС. Найденные звезды WR в условиях низкой металличности иногда приводят к пересмотру существующих представлений в области звездной эволюции. Так, например, звездный ветер одной из немногочисленных открытых звезд WO, находящейся в низкометаллической галактике IC 1613, оказался сильнее, чем предсказывали модели для данной металличности [5].

Много вопросов ставят перед исследователями и наиболее массивные звезды (VMS, $M > 100M_{\odot}$). Первые подтвержденные кандидаты в звезды с массами $\sim 100 - 200M_{\odot}$ были найдены в БМО [39], звезды с $M \sim 100M_{\odot}$ известны также в звездных скоплениях внутри МП (NGC 3603, [40]; Arches, [41]). Вклад звезд с такими массами в ионизацию и химическое обогащение МЗС очень значителен [39]; кроме того, они вероятно являются прародителями гамма-всплесков и

парно-нестабильных сверхновых [42]. Модели формирования и эволюции наиболее массивных звезд разработаны в настоящий момент в широких диапазонах металличности [33], однако наблюдательных данных для проверки этих моделей в настоящий момент нет.

Увеличение базы наблюдательных данных с учетом разброса по показателю металличности и начальным массам звезд, а также разработка новых теоретических методов их анализа и интерпретации позволят детально изучить процессы, происходящие с массивными звездами с пониженным содержанием тяжелых элементов на разных эволюционных стадиях и впоследствии усовершенствовать существующие теоретические модели звездной эволюции. Поэтому критически важно продолжать поиск новых объектов и проведение фотометрических и спектральных наблюдений массивных звезд в галактиках с пониженным содержанием тяжелых элементов [43; 44].

Поиск массивных звезд с разным показателем металличности зачастую проводят в близких карликовых галактиках (< 20 Мпк). Карликовые галактики представляют собой уникальную лабораторию для изучения формирования массивных звезд, их эволюции и взаимодействия с МЗС. Благодаря отсутствию в них крупномасштабной спиральной структуры в сочетании с малым гравитационным потенциалом и толстым газовым диском, в таких галактиках можно наблюдать развитие как протяженных газовых структур, связанных с жизнедеятельностью одиночных массивных звезд или небольших ассоциаций, так и образование оболочек и сверхоболочек, образованных несколькими поколениями массивных звезд. В более крупных галактиках подобные структуры могут быстро замываться из-за значительного влияния спиральных волн плотности [45; 46], что подтверждается, например, сильной корреляцией между размером оболочек нейтрального водорода (HI) и галактоцентрическим расстоянием и концентрацией оболочек между спектральными рукавами (см. [46]). Массивные звезды обладают большой светимостью, благодаря чему наблюдения отдельных массивных звезд в близких галактиках успешно проводятся с помощью космических и наземных (для наиболее близких галактик) телескопов. С помощью современных инструментов пространственно разрешаются отдельные области H II на расстояниях до 20 Мпк ([1]). В случае наиболее близких галактик зачастую детально прослеживается морфология ионизованного газа вокруг отдельных звезд, что дает возможность оценить возраст и скорость расширения оболочек,

сделать выводы об эволюционном пути звезды (см., например, [47; 48]). Кроме того, показатель металличности близких карликовых галактик варьируется в широких пределах: от металличности, близкой к солнечной (как, например, в галактике IC 225, [49]), до величин в 5-10 раз меньше (как в IC 1613, NGC 4068, NGC 2366, исследуемых в настоящей работе), и доходя до нескольких процентов от солнечной (как в случае DDO 68 [50] и I Zwicky 18 [51]).

Среди карликовых галактик отдельный интерес в контексте ранней Вселенной представляют объекты типа Green Pea (так называемые «Зелёные Горошины», [52; 53]) — компактные системы с интенсивным звездообразованием, обнаруженные на красных смещениях порядка $z \sim 0.1 - 0.3$. Эти галактики характеризуются высокими темпами звездообразования, пониженной металличностью, а также исключительно высоким ионизационным параметром. Галактики Green Pea демонстрируют признаки утечки фотонов Лайман-континуума [54], благодаря чему рассматриваются как локальные аналоги галактик, ответственных за реионизацию ранней Вселенной. На расстояниях $z \sim 0.2$ разрешить отдельные звезды уже невозможно, но для данных объектов найден аналог в Локальной Вселенной — Mrk 71, яркая область звездообразования в галактике NGC 2366 [55]. Таким образом, исследование галактики NGC 2366 позволяет напрямую изучать физические условия, при которых может возникать утечка ионизирующих фотонов, с высоким пространственным разрешением.

Исследования взаимодействия массивных звезд в карликовых галактиках с МЗС, а также поиск кандидатов в звезды на редких эволюционных стадиях возможны, в том числе, благодаря уникальным инструментам, позволяющим изучать кинематику ионизованного газа с высоким спектральным разрешением ($\text{FWHM} = 0.4\text{\AA}$ для линии $\text{H}\alpha$, Сканирующий Интерферометр Фабри-Перро, установлен на приборах SCORPIO-1 и SCORPIO-2 на 6-м телескопе БТА CAO РАН (Большой Телескоп Азимутальный Специальной Астрофизической Обсерватории Российской Академии Наук), [56]); получать длиннощелевые спектры тусклых объектов (спектрограф ТДС, КГО ГАИШ МГУ, [57]; SCORPIO-1 и SCORPIO-2 в режиме спектрографа, [58]), а также проводить узкополосную фотометрию, не захватывая лишние участки спектра (прибор ManGaL, устанавливается на 2,5-м телескоп КГО ГАИШ МГУ, [59]).

В рамках настоящей работы было детально изучено взаимодействие массивных звезд с окружающей межзвездной средой в трех карликовых галакти-

ках: NGC 2366, NGC 4068 и IC 1613. Все изученные галактики находятся в близкой Вселенной (расстояние 0,7; 3,3; 4,4 Мпк до IC 1613, NGC 2366 и NGC 4068 соответственно) и демонстрируют пониженное содержание тяжелых элементов ($Z \sim 0.1 Z_{\odot}$). Объединяет выборку галактик также и то, что все они испытывают вспышку звездообразования, а значит в них возможно наблюдение массивных звезд, как еще не успевших проэволюционировать, так и находящихся на короткоживущих и редких эволюционных стадиях.

Целью настоящей работы является изучение взаимодействия массивных звёзд с окружающим межзвёздным веществом в близких карликовых галактиках с низким содержанием тяжёлых элементов.

Исследование направлено на установление природы найденных по морфологии и кинематики объектов, потенциально связанных с массивными звездами на разных стадиях эволюции: слабых эмиссионных оболочек ионизованного газа, объектов, демонстрирующих пекулярную кинематику, известных кандидатов в WR и SNR. В работе всесторонне исследуется влияние массивных звезд на окружающий газ: химическое обогащение МЗС, ионизация окружающего газа посредством излучения, возможный вклад ударных волн. Работа основана на комплексном анализе фотометрических и спектроскопических наблюдений, включая узкополосную фотометрию, длинноцелевую и 3D-спектроскопию, с последующим сопоставлением наблюдаемых характеристик с теоретическими оценками и результатами проведенного спектрального моделирования.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. получение фотометрических и спектроскопических данных на 6-метровом телескопе БТА САО и 2,5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ; обработка полученных данных;
2. поиск дополнительной информации об исследуемых объектах в архивных данных наземных и космических телескопов (MUSE/VLT, WFC/HST, VLA, XMM-Newton, Swift/XRT);
3. ограничение параметров пекулярной туманности, найденной в галактике NGC 4068, с опорой на наблюдательные данные; проведение спектрального моделирования ионизирующей массивной звезды и окружающей туманности в согласии с проведенными оценками параметров;

4. анализ проведенных фотометрии и спектроскопии слабых ионизованных оболочек, найденных в галактике IC 1613; определение их природы на основании проведенного анализа;
5. определение природы известных кандидатов в звезды WR в галактике IC 1613; классификация объектов на основе данных спектроскопии; поиск новых кандидатов в проэволюционировавшие массивные звезды по данным спектрографа MUSE/VLT;
6. исследование мелкомасштабной кинематики газа в галактике NGC 2366 с помощью данных интерферометрии Фабри-Перро; определение природы найденных кинематически выделяющихся источников;
7. проведение химического анализа МЗС по всему полю галактики NGC 2366 с помощью данных длиннощелевой спектроскопии;

Методология и методы исследования

Теоретико-методологической базой диссертации являются работы [60], [61], [62] (BPT-диаграммы), [63] (фотоионизационные модели, полученные для газа с пониженной металличностью), [64] (карты распределения пыли в Галактике), [65], [66] (кривые поглощения).

Для поиска областей газа с высокой дисперсией скоростей были использованы I- σ диаграммы, описанные в работе [67].

В работе использовались классические методы оценки температуры и содержания тяжелых элементов: [68],[69] (T_e метод), [70; 71] (метод сильных линий). Оценки физических параметров ионизованного газа в галактиках NGC 4068 и NGC 2366 получены с использованием пакета `pyneb` [72] и поправочных коэффициентов из работ [73], [74].

Модельные треки звезд, используемые для определения природы объекта в галактике NGC 4068, описаны в работах [25] и [24]. Модели туманности, ионизованной звездой, были получены с помощью кода `Cloudy` [75; 76], версия 17.01 [76], и пакета `pyCloudy` [77]. Спектры ионизирующей звезды были смоделированы с помощью кода `smfgen` [78].

Интегральные потоки оболочек в линии $H\alpha$ сравнивались с количеством ионизирующих водород фотонов Лайман-континуума на основе соотношений из работ [79] и [80].

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Найденные новые массивные звезды с эмиссионными линиями в близких низкометаллических галактиках являются кандидатами в звезды Вольфа-Райе (2 кандидата в WR) и в яркие голубые переменные (2 кандидата в LBV). На основании спектральных и фотометрических данных показано, что пять предложенных кандидатов в звезды Вольфа-Райе в галактике IC 1613 не являются звездами Вольфа-Райе.
2. Пекулярный объект J120406.8 +523600 в галактике NGC 4068 хорошо описывается моделью туманности, ионизованной массивной звездой типа WR, обогащающей окружающую межзвездную среду азотом.
3. Межзвездная среда вокруг отдельных массивных звезд в карликовых низкометаллических галактиках NGC 4068 и NGC 2366 локально обогащена тяжелыми элементами (азотом и кислородом соответственно).
4. В межзвездной среде галактики NGC 2366 распределение кислорода неоднородно. Локальное обогащение межзвездной среды тяжелыми элементами может быть связано с истечением газа из области Mrk 71 под действием массивного скопления.

Научная новизна:

1. Большинство наблюдательных данных (80%), используемых в работе, являются оригинальными. Их анализ до этого не проводился и они не были нигде опубликованы;
2. Впервые обнаружена туманность с повышенной дисперсией скоростей в галактике NGC 4068 и проведено моделирование ее спектра. На основании проведенной работы объяснена вероятная природа туманности;
3. Для галактики IC 1613 впервые обнаружено несколько слабых оболочек в данных узкополосной фотометрии в линии H α . Проведен анализ данных оболочек и выявлены источники ионизации. Показано, что одна из оболочек, демонстрирующая рентгеновский точечный источник, может являться остатком сверхновой;
4. Впервые однозначно определен статус 5 кандидатов в звезды WR в галактике IC 1613. Показано, что звезды не относятся к типу WR; Найденны два новых кандидата в звезды LBV;
5. Впервые проведено исследование мелкомасштабной кинематики по всему полю галактики NGC 2366, что позволило обнаружить 20 объектов с

повышенной дисперсией скоростей в линии $H\alpha$; данный метод позволил обнаружить два новых кандидата в остатки сверхновых и один новый кандидат в звезду WR;

6. Впервые проведена прямая оценка металличности с помощью T_e -метода для 15 областей галактики NGC 2366 за пределами области Mrk 71; обнаружены вариации содержания кислорода по полю галактики, вероятно указывающие на обогащение МЗС тяжелыми элементами посредством истечения газа из области Mrk 71;

Научная и практическая значимость работы связана со значительным недостатком наблюдательных данных о последовательности эволюционных стадий и параметрах массивных звезд при пониженном содержании металлов в родительской среде галактик. Модели эволюции массивных звезд демонстрируют значительное расхождение при изменении начальных параметров звезд. Ввиду неопределенности этих параметров, на сегодняшний день однозначный выбор в пользу единственного типа моделей сделать невозможно. Так как массивные звезды оказывают решающее влияние на эволюцию газовой среды галактик, уточнение моделей эволюции звезд (и как следствие, их ключевых параметров на разных стадиях), является необходимым для понимания эволюции газовой среды галактик, ее химического обогащения, процессов обратной связи между звездами и газом, а также галактическими процессами, имеющими решающее значение в картине эволюции Вселенной (например, параметров утечки Лайман квантов). Таким образом, поиск кандидатов в массивные звезды на поздних стадиях эволюции (таких как WR, LBV), их моделирование и оценка параметров, также как и поиск остатков сверхновых в галактиках, бедных металлами, имеет большую значимость в контексте выбора наиболее достоверных эволюционных моделей звезд и понимания эволюции карликовых галактик.

Проводимые исследования напрямую связаны с изучением эволюции галактик в ранней вселенной, так как свойства исследуемых объектов – близких низкометаллических галактик – частично схожи со свойствами ранних галактик: а именно, сходны пониженная металличность, доминирование молодых звездных популяций, компактная морфология и нерегулярная структура. Например, галактика NGC 2366, изучаемая в данной работе, является локальным аналогом галактик типа Green Pea ($z \sim 0,2$), вероятно сходных с галактиками, ответственными за реионизацию ранней Вселенной. Изучение локальных аналогов дале-

ких галактик может пролить свет на процессы звездообразования, выброса газа из галактик, реионизации и химической эволюции. Глубокое понимание данных процессов необходимо для построения адекватных моделей эволюции галактик и моделирования процессов, происходящих в ранней Вселенной.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается использованием общепринятых зависимостей и калибровок.

Значение E_{B-V} для спектров оценивалось с помощью бальмеровского де-кремента, что является общепринятым подходом при анализе эмиссионных областей H II. В тех случаях, когда была возможна только оценка Галактического покраснения, мы использовали значения E_{B-V} из работы [64], полученное с помощью пакета `dustmaps` [81]. Затем мы использовали кривую из работы [65], параметризованную как описано в [66].

Линии, разделяющие области фото- и ударной ионизации, используемые в данной работе, взяты из классических работ [61] и [62]; в настоящий момент именно данные калибровки считаются стандартными. Для анализа областей H II галактик IC 1613 и NGC 2366 также использованы модели из работы [63], что обосновано сильной зависимостью положения разделительных линий на BPT-диаграмме от металличности исследуемых областей.

Модельные треки звезд из работы [24] наиболее часто используются при моделировании массивных звезд; мы также использовали треки из работы [25], в которых содержание тяжелых элементов иначе шкалируется на низкую металличность, что позволяет получить массивные звезды WR для металличности $0.1Z_{\odot}$, которые невозможно получить в случае использования модельной сетки из [24]. Модели изучаемой туманности в галактике NGC 4068 были получены с помощью фотоионизационного кода `Cloudy` [75; 76] с использованием звезд, смоделированных с помощью кода `smfgen` [78], как входного параметра. Оба кода широко используются в области изучения массивных звезд, окруженных туманностями.

T_e -метод оценки температуры и содержания тяжелых элементов, используемый в работе, является наиболее достоверными, что показано в работе [69]. Мы также использовали эмпирическую S-калибровку для определения металличностей областей: [70]. Данная калибровка наиболее точно совпадает с T_e -методом, несмотря на больший по сравнению с T_e -методом разброс получаемых значений.

Апробация работы Результаты диссертационной работы опубликованы в 3 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра РИНЦ «eLibrary Science Index», международными базами данных (Web of Science, Scopus, RSCI) и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия. Основные результаты работы лично докладывались соискателем на следующих мероприятиях:

1. Международная конференция «15th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics», 9-13 июня 2025 («Metallicity and small-scale kinematics in local starforming galaxy NGC 2366 »);
2. Международная конференция «XXXII IAU General Assembly», Кейптаун, ЮАР, 6-15 августа 2024 («Diffuse emission sources and massive stars in the dwarf metal-poor galaxy IC 1613 », стендовый доклад);
3. Международная конференция «XX Serbian astronomical conference», Сербская Академия Наук и Искусств, Белград, Сербия, 16-20 октября 2023 («Nature of the diffuse emission sources in the HI supershell in the galaxy IC 1613»);
4. Международная конференция «IAU Symposium 361», Балликоннелл, Ирландия, 8-13 мая 2022 («Metal-poor Wolf-Rayet star enriching the ISM by nitrogen in the nearby galaxy NGC 4068», стендовый доклад);
5. Международная конференция «XIII Serbian Conference on spectral line shapes in astrophysics», Онлайн, Сербия, 23-27 августа 2021 («CLOUDY model of peculiar emission nebula in low-metallicity galaxy NGC 4068»);
6. Международная конференция «Идеи С.Б.Пикельнера и С.А.Каплана и современная астрофизика», ГАИШ, Москва, Россия, 8-12 февраля 2021 («Моделирование туманности с пекулярным эмиссионным спектром в низкометаллической галактике NGC 4068»);
7. Семинар ИКИ РАН, март 2024 («Взаимодействие массивных звезд с межзвездной средой в карликовых низкометаллических галактиках»);
8. Семинар ИТЭФ (ККТЭФ КИ), февраль 2023 («Исследование массивных звезд в карликовых галактиках с низкой металличностью»);

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 3 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра РИНЦ «eLibrary Science

Index», международными базами данных (Web of Science, Scopus, RSCI) и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности

1.3.1. Физика космоса, астрономия:

- (a1) Yarovova Anastasiya, Egorov Oleg, Moiseev Alexei, Maryeva Olga / Unveiling the nitrogen-rich massive star in the metal-poor galaxy NGC 4068 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, том 518, № 2, с. 2256-2272, 2023. EDN: NJJXTJ. Импакт-фактор 1.03 (JCI). Личный вклад автора 60%. Объем 2.08 печатных листов.
- (a2) Yarovova Anastasiya, Moiseev Alexei, Gerasimov Ivan, Vučetić Milica, Egorov Oleg, Ilić Dragana, Mereminskiy Ilya, Pakhomov Yury, Sholukhova Olga / Nature of the diffuse emission sources in the H i supershell in the galaxy IC 1613 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, том 529, № 4, с. 4930-4946, 2024. EDN: WXOMZU. Импакт-фактор 1.03 (JCI). Личный вклад автора 80%. Объем 1.96 печатных листов.
- (a3) Yarovova Anastasiya, Gerasimov Ivan, Egorov Oleg, Moiseev Alexei, Vasiliev Konstantin, Lozinskaya Tatiana / Chemical abundances and small-scale gas kinematics in the local star-forming galaxy NGC 2366 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, том 541, № 4, с. 3913–3931, 2025. Импакт-фактор 1.03 (JCI). DOI: 10.1093/mnras/staf1152 (EDN не известен). Личный вклад автора 45%. Объем 2.19 печатных листов.

Личный вклад

В работах 1), 2), 3) вклад автора составляет 60, 80 и 45% соответственно. В работе 1) автор принимал участие в постановке задачи, получении наблюдательных данных, построении моделей туманности с помощью кода CLOUDY, равно как и в анализе полученных данных и формулировке результатов. В работе 2) автор принимал участие в обработке и анализе данных, формулировке результатов. В работе 3) автором был проведен анализ данных длиннощелевой спектроскопии, химический анализ межзвездной среды галактики и анализ кинематики области Mrk 71. Во всех приведенных работах вклад автора в работу над текстом статей и формулировку основных выводов является решающим.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 143 страницы с 34 рисунками и 10 таблицами. Список литературы содержит 202 наименования.

Глава 1. Наблюдательные данные и методы, используемые в работе¹

В настоящей работе большое внимание уделяется получению, обработке и интерпретации наблюдательных данных. Данная глава посвящена описанию основных типов наблюдательных данных, используемых в работе, а также методов их обработки и наиболее важных методов анализа.

1.1 Наблюдательные данные

1.1.1 Длиннощелевая спектроскопия

Одним из главных методов получения информации о межзвездной среде (МЗС) галактик в оптическом диапазоне является длиннощелевая спектроскопия. Данный метод позволяет пространственно разрешать спектральные особенности протяжённых объектов, таких как туманности, области H II или остатки сверхновых (ОСН). Размещая длинную щель на наблюдаемом объекте, мы получаем спектры всех областей вдоль щели. Такие наблюдения дают возможность детального изучения ионизационных структур вдоль щели, а также полей скоростей, физических параметров (температура, плотность) и химического состава МЗС, что критично для понимания процессов, связанных со звездообразованием, включая процессы обратной связи между массивными звездами и МЗС.

В настоящей работе анализируются оптические длиннощелевые спектры областей ионизованного газа в трех близких карликовых галактиках: NGC 4068, IC 1613 и NGC 2366. Большинство длиннощелевых спектров, используемых в работе, получено на спектрографе TDS ([57], установлен на 2,5-метровом телескопе КГО ГАИШ МГУ (далее - 2,5-м телескоп КГО), разрешающая способность $R \sim 1300$ (синий канал), 2500 (красный канал)), и фокальных редукторах SCORPIO-1 ($R \sim 500$) и SCORPIO-2 ($R \sim 2000$, [82], [83], устанавливаются на 6-метровом телескопе БТА САО РАН (далее - БТА)). Во всех наблюдениях ши-

¹Данная глава основана на работах (a1), (a2) и (a3) из списка публикаций по теме диссертации

рина щели составляла ~ 1 угл.сек, что позволяет собрать большую часть света от звездообразного объекта без существенных потерь разрешения, особенно в условиях, когда качество изображения близко к 1 угловой секунде.

Длиннощелевые спектры для галактики IC 1613 были получены на БТА с использованием фокальных редукторов SCORPIO-1 и SCORPIO-2. Первые три спектра были получены в сентябре 2020 года на SCORPIO-1 и решетке VPHG550G в спектральном диапазоне 3650-7740 Å. Четвертый спектр был получен в декабре 2020 года на SCORPIO-2 и решетке VPHG1200@540² в спектральном диапазоне 3600-7070 Å. Данные длиннощелевой спектроскопии использовались для определения природы ионизации слабых оболочек, найденных нами в галактике.

Первые два спектра изучаемой туманности в галактике NGC 4068 были получены на приборе SCORPIO-2 в феврале 2014 и апреле 2015 года в спектральном диапазоне 3600-7070 Å. Два других спектра были получены с помощью спектрографа TDS в феврале и декабре 2020 года, одновременно в зеленом (3600-5770 Å) и красном (5670-7460 Å) спектральных каналах. Полученные спектры позволили оценить физические параметры изучаемой туманности и стали основанием для построения модели WR звезды, окруженной туманностью.

Для анализа МЗС в галактике NGC 2366 были получены три длиннощелевых спектра на приборе SCORPIO-2 с использованием решетки VPHG1200@540 в спектральном диапазоне 3650-7200 Å: два спектра в декабре 2017 года и один – в марте 2023 года. На основе спектральных данных была проведена оценка параметров МЗС: плотности, электронной температуры, химического состава.

Описание параметров всех проведенных наблюдений, включая поле зрения приборов, время экспозиции, качество изображений во время наблюдений и спектральное разрешение приборов представлено в таблице 1.

Обработка спектральных данных, полученных на приборах SCORPIO-1 и SCORPIO-2, проводилась стандартным способом с использованием программы на базе IDL (автор программы - Алексей Моисеев, описана в работе [84]). Обработка данных, полученных на 2,5-м телескопе КГО, была проведена с помощью программы, написанной на языке PYTHON (автор программы - Олег Егоров). Обработка данных включала все стандартные шаги, включая удаление следов космических лучей, коррекцию плоского поля, коррекцию за нелинейность де-

²Подробное описание параметров решеток содержится на сайте <https://www.sao.ru/Doc-k8/Telescopes/bta/instrum/>

тектора, а также вычитание свечения атмосферы. Для увеличения соотношения сигнал/шум (S/N) применялся биннинг пикселей.

Для калибровки длиннощелевых спектров объектов по абсолютной интенсивности мы использовали снятые в те же ночи спектры спектрофотометрических звезд-стандартов, находящихся на аналогичном объекту зенитном расстоянии сразу после или перед наблюдениями объекта.

Для каждой из исследуемых областей мы получали одномерные спектры путем суммирования сигнала в апертурах, соответствующих положению на щели интересующих нас источников, визуально проверяя, что сигнал от объектов полностью попадает в выбранную апертуру. Для оценки потоков эмиссионных линий был использован собственный код автора работы, написанный на языке PYTHON. Для измерения интегральных потоков в эмиссионных линиях использовалась аппроксимация функцией Гаусса в тех случаях, когда функция рассеяния линии (LSF) совпадала с данной функцией. В случае более сложной LSF использовалась многокомпонентная функция, состоящая из нескольких функций Гаусса. Ошибки потоков в эмиссионных линиях оценивались методом Монте-Карло. Для этого в случае каждой линии проводилось сто итераций с вариацией потока в каждом пикселе на случайную величину со стандартным отклонением, соответствующим ошибке потока в данном пикселе, определенной на этапе обработки спектра.

1.1.2 Данные 3D-спектроскопии

Метод 3D-спектроскопии основан на получении спектральной информации одновременно от большого количества источников в поле зрения, предоставляя возможность изучать протяжённые или сложные по структуре объекты целиком, а не отдельными регионами. Данные 3D-спектроскопии позволяют получить информацию о динамике газа в изучаемых областях галактик, а также о вариациях по полю таких параметров, как электронная температура, химический состав газовой среды, плотность. К настоящему моменту метод является хорошо разработанным и применяется на многих приборах по всему миру, причем схемы спектрографов и их параметры значительно различаются. В качестве

примеров различных схем 3D-спектрографов можно привести приборы (TIGER [85], INTEGRAL[86], SINFONI [87], MUSE [88], Scanning IFP/BTA [89]).

В настоящей работе использовались данные 3D-спектроскопии, полученные на фокальном редукторе SCORPIO-2 в режиме интерферометра Фабри-Перро (ИФП/БТА [89]) и архивные данные, полученные на приборе Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE, VLT, [88]). Высокое спектральное разрешение интерферометра Фабри-Перро ($R \sim 16000$) позволяет получить профиль выбранной эмиссионной спектральной линии. Обычно для картирования выбираются линии $H\alpha$ или $[O\ III]5007$, зачастую являющиеся наиболее яркими в оптическом спектре. В данной работе для галактик NGC 4068 и NGC 2366 использовалась линия $H\alpha$. Обработка используемых в работе кубов Фабри-Перро проводилась стандартным методом, описанным в работе [90]. В данной работе с помощью данных интерферометрии Фабри-Перро была обнаружена туманность с peculiarными свойствами в галактике NGC 4068 и ряд объектов с выделяющейся кинематикой в галактике NGC 2366.

MUSE — панорамный интегрально-полевой спектрограф, работающий в видимом диапазоне длин волн (от 4600 до 9300 Å), имеющий поле зрения $1' \times 1'$, высокое пространственное разрешение ($\sim 0.4''$) и пространственную дискретизацию ($0.2''/\text{пиксель}$). Указанное поле зрения не может полностью покрыть изучаемые в данной работе объекты (близкие карликовые галактики), но подходит для изучения их отдельных областей, в.т.ч. звездного населения в выделенных участках. При изучении массивных звезд в галактике IC 1613 были использованы архивные данные спектрографа интегрального поля MUSE/VLT по программам PI: Bian; 105.20GY.001 and PI: Battaglia; 097.B-0373(A). Мы использовали данные, предобработанные стандартными процедурами, используемыми для кубов данных MUSE.

1.1.3 Фотометрические данные

Изображения в узких фильтрах позволяют оценить полный поток в линии от исследуемого эмиссионного источника, что невозможно сделать, опираясь только на спектральные данные. Узкополосные фотометрические наблюде-

ния играют ключевую роль в изучении физических процессов, происходящих в ионизованном газе галактик, позволяя пространственно разрешить и отличить друг от друга области звездообразования, ударной ионизации и влияния массивных звёзд. Карта галактики в линии $H\alpha$ позволяет выявить области активного звездообразования, где водород ионизован ультрафиолетовым излучением молодых массивных звёзд или другими механизмами — например, ударными волнами или активностью ядра (если оно присутствует). Линия $[O\ III]$ чувствительна к более высокоэнергетичному ионизирующему излучению, поэтому карта отношения $[O\ III]/H\alpha$ позволяет проследить пространственные вариации в степени ионизации газа и выявить участки с жёстким излучением, характерным, например, для регионов истечения газа из ярких областей звездообразования. Повышенное отношение $[S\ II]/H\alpha$ может свидетельствовать о вкладе ударной ионизации (см. [91]). Изображения в фильтре $He\ II$ ($\lambda 4686\ \text{\AA}$) позволяют обнаружить звёзды типа WR, поскольку одна из характерных эмиссионных линий этих звёзд попадает в данный фильтр.

Помимо спектральных данных, данная работа также опирается на глубокие данные оптической фотометрии в фильтрах $H\alpha$, $[S\ II]$, $He\ II$, $[O\ III]$, полученные на телескопах КГО (2,5-м), БТА и РТТ-150, а также архивные данные космического телескопа Хаббла (HST).

Мы использовали стандартные процессы обработки данных, включающие вычитание систематической ошибки, выравнивание поля, коррекцию вариаций атмосферного поглощения и качества изображения. Различные экспозиции были объединены с использованием сигма-клиппинга для удаления следов космических лучей и артефактов. Все фотометрические данные, полученные в работе, сведены в таблицу 1. Для каждого узкополосного изображения был получен калибровочный кадр в узкополосном фильтре с близкой центральной длиной волны, но не захватывающем эмиссионные линии. Данные кадры вычитались для удаления с финальных изображений звёзд.

Прямое изображение галактики NGC 4068 в линии излучения $[O\ III]\lambda 5007$ было получено на многорежимном фокальном редукторе SCORPIO-2 с узкополосным фильтром AC5014 (центральная длина волны $CWL = 5018\ \text{\AA}$, ширина фильтра $FWHM = 32\ \text{\AA}$, значения приведены в таблице 1). Также использовались изображения галактики NGC 4068, полученные с помощью камеры Advanced Camera for Surveys (ACS) с детектором Wide Field Camera (WFC) те-

лескопа HST с широкополосными фильтрами $F606W$ и $F814W$ и фотометрия звезд из работы [92], основанная на этих изображениях.

Для галактики IC 1613 мы получили изображения в фильтрах [S II] и $H\alpha$ на 1,5-м телескопе RTT150. Также на 2,5-м телескопе КГО с помощью прибора NBI (Niels Bohr institute Wide Field CCD Imager, прибор описан в работе [93]) нами было получено более глубокое изображение галактики в линии $H\alpha$. Изображение галактики в линии He II $\lambda 4686$ было также получено на 2,5-метровом телескопе КГО с использованием фотометра с перестраиваемым фильтром MaNGaL (Mapper of Narrow Galaxy Lines, описан в работе [59]). Данные фотометрии использовались для уточнения природы кандидатов в звезды WR, а также для поиска и изучения природы слабых ионизованных оболочек. Для оценки полного потока в линии [O III] $\lambda 5007$ изучаемой туманности в галактике NGC 4068 на телескопе БТА была получена карта в соответствующей линии.

Для анализа состояния ионизации газа в галактике NGC 2366 были получены карты $H\alpha$, [S II] и [O III] с помощью узкополосных фильтров на 2,5-метровом телескопе КГО. На основании полученных данных был проведен анализ карт отношения линий [S II]/ $H\alpha$ и [O III]/ $H\beta$.

1.1.4 Данные многоволновой астрономии

В тех случаях, когда полученных оптических данных было недостаточно для определения природы изучаемых объектов, мы обращались к архивным УФ-, рентген- и радио- данным.

Для уточнения природы изучаемой туманности в галактике NGC 4068, мы изучили УФ-изображения изучаемой туманности, полученные с помощью ультрафиолетового/оптического телескопа *Swift* (UVOT) в фильтре UVW2 ($CW = 2000 \text{ \AA}$). Для сравнения распределения нейтрального и ионизованного газа в оболочках в галактике IC 1613 мы также использовали данные радионаблюдений на диапазоне 21 см, полученные в обсерватории VLA. Подробное описание радиоданных приведено в работе [94]. Кроме того, использовались архивные данные XMM-Newton [95] и *Swift*/XRT [96], [97], с помощью которых нашли

Таблица 1 — Журнал наблюдений всех данных, полученных для выполнения работы: название набора данных, дата наблюдений, общее время экспозиции T , поле зрения (FOV), угловой размер элемента изображения, качество изображения (θ), спектральный диапазон ($\Delta\lambda$) и спектральное разрешение ($FWHM$)

тип данных	Дата	T, с	FOV	уг. раз., "	θ , "	$\Delta\lambda$, Å	FWHM, Å
Фотометрия галактики IC 1613							
TFOSC	2015 Sep 12	6000	$13' \times 13'$	0.39	1.8	H α	80
TFOSC	2015 Sep 12	6000	$13' \times 13'$	0.39	1.9	[S II]	54
TFOSC	2015 Sep 12	6000	$13' \times 13'$	0.39	1.8	Continuum (red)	350
NBI	2019 Dec 30	3000	$10' \times 10'$	0.15	2.3	H α	77
NBI	2019 Dec 30	1800	$10' \times 10'$	0.15	2.2	continuum	122
MaNGaL	2020 Nov 12	3600	$5.6' \times 5.6'$	0.33	1.4	HeII	13
MaNGaL	2020 Nov 12	1500	$5.6' \times 5.6'$	0.33	1.4	Continuum (red)	13
MaNGaL	2020 Nov 12	1500	$5.6' \times 5.6'$	0.33	1.4	Continuum (blue)	13
MaNGaL	2020 Nov 14	2400	$5.6' \times 5.6'$	0.33	1.1	HeII	13
MaNGaL	2020 Nov 14	1200	$5.6' \times 5.6'$	0.33	1.1	Continuum (red)	13
MaNGaL	2020 Nov 14	1200	$5.6' \times 5.6'$	0.33	1.1	Continuum (blue)	13
Длиннощелевая спектроскопия галактики IC 1613							
SC-1 PA= -2°	2020 Sep 24	4500	$1'' \times 6.1'$	0.36	1.7	3650-7740	12
SC-1 PA= 15°	2020 Sep 24	7200	$1'' \times 6.1'$	0.36	1.5	3650-7740	12
SC-1 PA= -15°	2020 Sep 24	6300	$1'' \times 6.1'$	0.36	1.1	3650-7740	12
SC-2 PA= -5°	2020 Oct 11	5400	$1'' \times 6.1'$	0.4	1.7	3650-7300	4.8
Данные фотометрии и ИФП для галактики NGC 4068							
Image AC5014	2021 May 06	1800	$5.8' \times 4.8'$	0.4	1.6	[OIII] 5007 Å	32
FPI	2012 Mar 18	6400	$6.1' \times 6.1'$	0.7	1.2	H α	0.4
Длиннощелевая спектроскопия галактики NGC 4068							
SC-2 PA= 43°	2014 Feb 25	2700	$1'' \times 6.1'$	0.36	1.0	3600-7070	4.8
SC-2 PA= 51°	2015 Apr 24	2700	$1'' \times 6.1'$	0.36	1.8	3600-7070	4.8
TDS PA= 41°	2020 Feb 23	9×600	$1'' \times 3'$	0.35	1.5	3600-5770	2.4
				0.37		5670-7460	2.6
TDS PA= 131°	2020 Dec 25,27	8×1200	$1'' \times 3'$	0.35	1.7	3600-5770	2.4
				0.37		5670-7460	2.6
Фотометрия галактики NGC 2366							
CMO [O III] 5007 Å	2018 Feb 15,17	2100	11.1×10.6	0.155	0.9–1.2	4992	120.8
CMO [O III] continuum	2018 Feb 15,17	1500	11.1×10.6	0.155	0.9–1.2	5117.8	94.6
CMO H α + [N II]	2018 Feb 15,17,21	1800	11.1×10.6	0.155	0.9–1.2	6559	76.5
CMO H α continuum	2018 Feb 15	600	11.1×10.6	0.155	0.8–1.0	6426.9	122.6
CMO [S II] 6716+6731 Å	2018 Feb 21	2400	11.1×10.6	0.155	1.0-1.25	6721.3	56.8
CMO [S II] continuum	2018 Feb 21	900	11.1×10.6	0.155	1.0-1.25	6959.7	153
Длиннощелевая спектроскопия галактики NGC 2366							
SC-2 PA= 34°	2017 Dec 10	2100	1×6.1	0.36	2.8	3650-7200	4.5
SC-2 PA= 32°	2017 Dec 10	3600	1×6.1	0.36	2.0	3650-7200	4.5
SC-2 PA= 87°	2023 Mar 18	6300	1×6.8	0.4	2.8	3650-7200	4.5
3D-спектроскопия NGC 2366							
SC-2 FPI	2022 Dec 31	150×40	6.8×6.8	0.4	1.8	8.8 Å around H α	0.48

рентгеновский источник в центре одной из слабых оболочек, найденных по карте $H\alpha$.

1.2 Методы анализа ионизованного газа в галактиках

Для анализа наблюдательных данных использовались апробированные методики, ранее изложенные в научной литературе. В настоящем разделе приведено описание тех подходов, которые являются методологически значимыми и непосредственно применимыми к задачам данного исследования.

1.2.1 Анализ кинематики МЗС галактик с помощью данных интерферометрии Фабри-Перро

На основе данных интерферометрии Фабри-Перро, описанных в разделе 1.1.2, возможно проведение анализа кинематики ионизованного газа по всему полю изучаемой галактики. Спектральное разрешение эмиссионной линии, картированной таким методом, очень высоко (прибор IFP751: $0,4 \text{ \AA}$ в линии $H\alpha$), что позволяет обнаружить уширение или многокомпонентность исследуемой линии в каждом исследуемом спакселе (минимальный элемент изображения, полученного при интегральной полевой спектроскопии, содержащий полный спектр для соответствующей области на небе). В работе [67] было показано, что построение диаграммы, по осям которой отложены интенсивность и дисперсия скоростей эмиссионной линии позволяет разделить диффузный газ, классические HII-области и объекты с другой природой: расширяющиеся оболочки, проэволюционировавшие звезды с мощным звездным ветром. Последний тип объектов располагается на диаграмме (далее – диаграмма $I-\sigma$) в выделенной диагональной области. Для надежного отнесения объекта к этому типу необходимо, чтобы сразу несколько спакселей попадали в диагональную область на $I-\sigma$ диаграмме. Описанная в работе [67] методика выделения объектов, связанных с эволюцией массивных звезд, имеет большое значение в контексте настоящей диссертации

и применялась для поиска массивных звезд на поздних стадиях эволюции и кандидатов в остатки сверхновых в галактиках NGC 4068 и NGC 2366. Данный метод был многократно протестирован и успешно применяется при изучении близких карликовых галактик, в том числе, в работах [98], [84], [99] и др.

1.2.2 Диагностические ВРТ-диаграммы

Метод построения диагностических ВРТ-диаграмм впервые описан в работе [60] и создан для классификации внегалактических объектов, таких как нормальные области H II, планетарные туманности, объекты со степенным континуумом и объекты, ионизованные ударными волнами. Предложенный метод основан на сравнении интенсивностей эмиссионных линий, чувствительных к различным механизмам ионизации. В частности, в оригинальной статье было предложено использовать для диагностики состояния газа кривую, полученную на основе отношения линий $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ и $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$. Метод слабо зависит от поглощения, так как используются отношения близких спектральных линий.

В настоящей работе используются зависимости $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ от $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$ и $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ от $[\text{S II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$, полученные в более поздних работах [61] и [62], позволяющие в случае карликовых низкометаллических галактик без признаков присутствия активного галактического ядра разделить газ, ионизованный излучением массивных звезд от газа, ионизованного ударными волнами.

Хотя приведённые модели являются классическими, они недостаточно хорошо описывают условия низкой металличности, характерные для рассматриваемых в данной работе галактик (в частности, IC 1613 и NGC 2366). Для более корректного сравнения с межзвёздной средой с пониженным содержанием тяжёлых элементов мы также опирались на фотоионизационные модели из работы [63]. Эти модели построены, в том числе, для близкой к значениям для изучаемых галактик металличности $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8$ и отношения $\log(\text{N}/\text{O}) = -1,5$, характерного для галактик с указанным содержанием кислорода.

1.2.3 Методы оценки параметров межзвездной среды галактик

Определение таких параметров газовой среды галактик, как электронная плотность, электронная температура, содержание химических элементов, является критически важным для понимания процессов, связанных с деятельностью массивных звезд, а также процессов обратной связи между звездами и газом. В настоящий момент разработано много методов определения данных параметров на основе спектральных данных (например см. [68] (T_e -метод), [70; 71] (метод сильных линий), а также [69] и ссылки внутри работы). Полученные в разных работах зависимости не всегда сходятся между собой, а также значительно различаются для областей H II с разной металличностью.

Прямой метод (T_e -метод) является одним из наиболее надёжных подходов к определению химического состава ионизованного газа в галактиках. В его основе лежит использование температурочувствительных эмиссионных линий, например авроральной линии [O III] $\lambda 4363$, которая, в сочетании с более интенсивными линиями [O III] $\lambda 4959, 5007$, позволяет вычислить электронную температуру в зонах с дважды ионизованным кислородом, или аналогично линии [N II] $\lambda 5755$ в сочетании с [N II] $\lambda 6548, 6584$. Зная T_e , рассчитанную для определенной зоны ионизации кислорода или азота, а также электронную плотность, можно напрямую рассчитать содержание соответствующего иона в интересующей области, а затем и содержание других ионов, полагаясь на эмпирические соотношения между температурами различных ионизационных зон (см. например, [74]). В данной работе металличность изучаемых объектов в галактиках NGC 4068 и NGC 2366 определялась на основе линии [O III] $\lambda 4363$. Хорошая детектируемость этой слабой линии характерна для низкометаллических областей с высокой температурой [91].

В настоящей работе для определения плотности и температуры изучаемых областей, а также содержания химических элементов с помощью T_e -метода использовался пакет `pyneb` (см. работу [72]), написанный на языке PYTHON. Опираясь на заданные пользователем отношения наблюдаемых спектральных линий и вложенные физические законы, PyNeb осуществляет вычисление физических параметров в газовой среде, таких как электронная температура и плотность, а также рассчитывает содержание ионов и элементов.

Для изучаемых объектов в галактиках NGC 4068 и NGC 2366, электронная температура $T_e(\text{O III})$, соответствующая зонам дважды ионизованного кислорода (O^{2+}), рассчитывалась на основе отношения интенсивностей линий $[\text{O III}]\lambda 4363/\lambda 5007,4959$. Для оценки электронной температуры в зонах, где доминирует однократно ионизованный кислород, использовалась эмпирическая зависимость $T_e(\text{O}^+) = 0.7T_e(\text{O}^{2+}) + 3000$ К из работы [74]. Плотность электронов n_e оценивалась на основе отношения интенсивностей линий $[\text{S II}]\lambda 6716/[\text{S II}]\lambda 6731$.

Используя полученные на предыдущем шаге значения температуры и электронной плотности, мы далее рассчитывали содержания кислорода и азота: металличность по иону O^{2+} была определена из отношения потоков $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$, а металличность по O^+ — из отношения $[\text{O II}]\lambda 3727/\text{H}\beta$. Общее содержание кислорода O/H оценивалось как $(\text{O}^{2+} + \text{O}^+)/\text{H}^+$. Отношение N/O определялось как N^+/O^+ на основе отношения $[\text{N II}]\lambda 6583/\text{H}\beta$.

Кроме T_e -метода, при анализе областей галактики NGC 2366 для определения содержания кислорода была использована эмпирическая S-калибровка (подробное описание приведено, например, в работе [69]). Для S-калибровки используются отношения потоков в хорошо детектируемых линиях $[\text{O III}]$, $\text{H}\beta$, $[\text{N II}]$ и $[\text{S II}]$. Хотя этот метод в целом согласуется с T_e -методом (поскольку он откалиброван на областях H II с измеренным T_e), он менее точен и может быть более чувствителен к вариациям условий ионизации, вызванных отклонением условий среды от «типичных» областей H II.

Во всех случаях погрешности для величин T_e , n_e , $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ были рассчитаны методом Монте-Карло с проведением 100 итераций и вариацией всех параметров, для которых на предыдущем шаге были определены погрешности. В случае $12 + \log(\text{O}/\text{H})$, учитываются ошибки потоков эмиссионных линий, а также ошибки определения T_e и n_e .

1.2.4 Оценка энергетического баланса между O-звездами и МЗС

Оценка энергетического баланса между УФ-излучением наблюдаемых O-звезд и потоком от ионизованного газа в линии $\text{H}\alpha$ позволяет понять, доста-

точно ли излучение наблюдаемых звезд для ионизации наблюдаемых оболочек. Случаи рассогласования могут указывать, например, на вклад предыдущих поколений О-звезд в ионизацию оболочек (см. [16; 17]). Данный анализ может также выявлять случаи утечки УФ-квантов из области звездообразования.

Чтобы сравнить потоки от изучаемых оболочек в линии $H\alpha$ в галактике IC 1613 с количеством ионизирующих квантов Лайман-континуума ($L_y C$, $\lambda < 912 \text{ \AA}$), испускаемого массивными звездами, вероятно связанными с этими оболочками, мы использовали соотношение между $L_y C$ -фотонами ($Q_{H\alpha}$) и потоками О-звезд M_V , установленное и описанное в работе [79]. Чтобы получить информацию о потоках массивных звезд M_V , мы использовали фотометрические каталоги галактик: в данной работе использовался каталог из работы [100]. Мы оценили количество ионизирующих квантов $L_y C$ опираясь на классическое соотношение [80]: $Q_{H\alpha}^0 \simeq \frac{L(H\alpha)}{0.45h\nu}$.

Глава 2. Определение природы пекулярной туманности в галактике NGC 4068¹

Данная глава посвящена изучению пекулярной туманности, найденной в галактике NGC 4068, и определению природы ее ионизации. Близкая карликовая неправильная галактика NGC 4068 расположена на расстоянии $D \sim 4,36$ Мпк [101]. Наши спектральные длиннощелевые наблюдения указывают на эффективное содержание кислорода (т.е. на $0,4R_{25}$) в этой галактике, равное $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \sim 7,85$ ($Z \sim 0,15Z_{\odot}$), причем на периферии галактики содержание падает до $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \sim 7,4$ ($Z \sim 0,05Z_{\odot}$). Эта оценка согласуется со светимостью NGC 4068 ($M_B \sim -15,1$ [102]), соответствующей $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \sim 7,8$ согласно соотношению светимость-металличность для галактик из работы [103].

Во время анализа кинематики ионизованного газа в галактике NGC 4068 по данным 3D-спектроскопии методом, описанным в 1, были обнаружены три компактные туманности, имеющие одновременно высокую поверхностную яркость и большую дисперсию лучевых скоростей в линии $\text{H}\alpha$ (найденные объекты обозначены как #А, #В и #С на рис. 2.2).

Как ранее было показано в работе [67], сочетание таких характеристик встречается у таких объектов, как звезды типов WR и LBV, а также у расширяющихся остатков сверхновых. Проведенная длиннощелевая спектроскопия на приборах SCORPIO-2/БТА и TDS/КГО (см. 1.1.1) показала, что хотя объекты #В и #С имеют соотношение потоков эмиссионных линий, типичное для SNR, объект #А (с координатами $\text{RA} = 12\text{h}04\text{m}06.8\text{s}$, $\text{Dec} = 52^{\circ}36'0''$) демонстрирует очень необычный спектр со слабыми эмиссионными линиями $[\text{S II}]\lambda 6717,6731 \text{ \AA}$ и самым высоким отношением $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ в галактике (рис. 2.5, 2.6). Мы провели моделирование спектров возможных источников ионизации – массивных звезд, находящихся на поздних эволюционных стадиях – с помощью кода `smfgen`, и затем, опираясь на звездные модели, построили модель спектра туманности с помощью фотоионизационного кода `CLOUDY` целью выяснения природы этого объекта.

¹Данная глава основана на работе (a1) из списка публикаций по теме диссертации

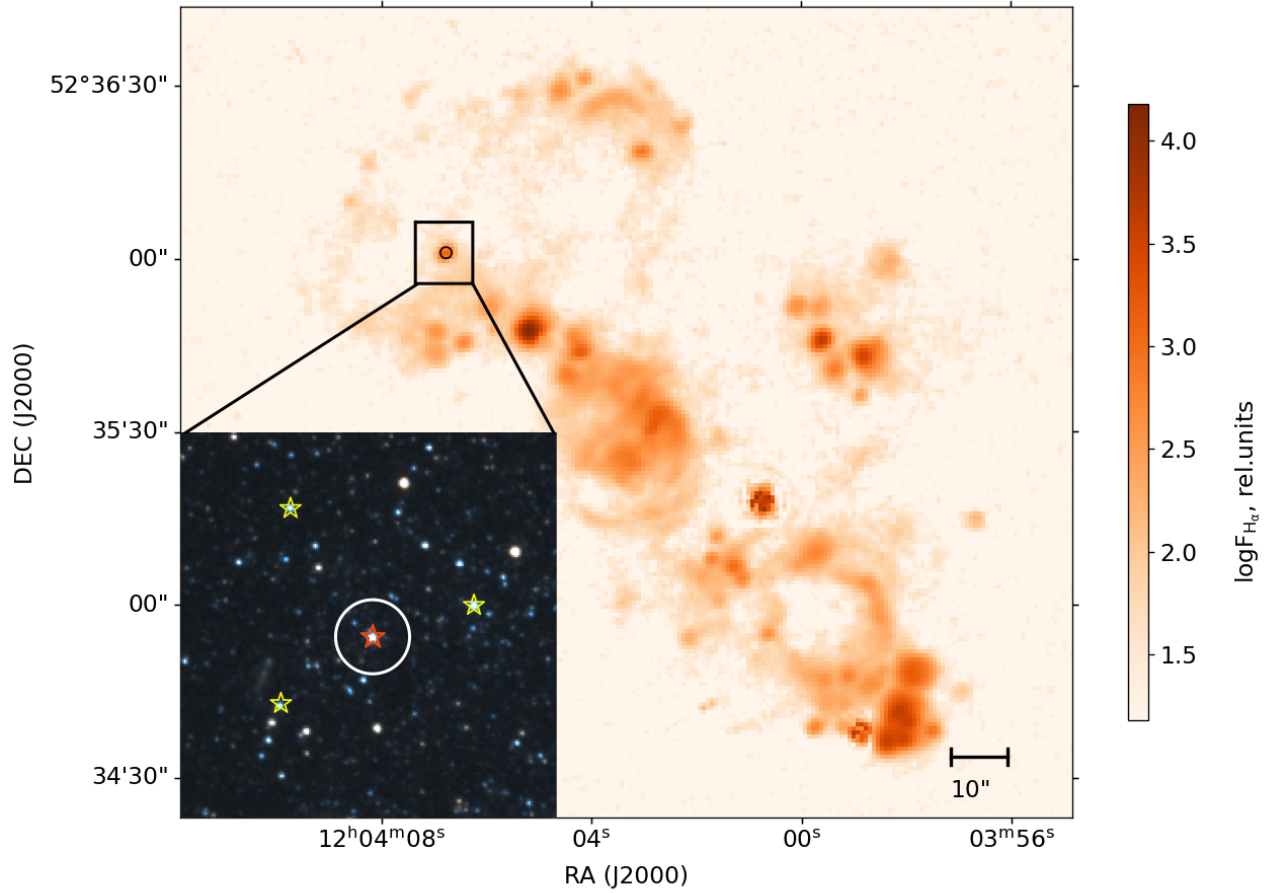


Рисунок 2.1 — Карта галактики NGC 4068 в эмиссионной линии $H\alpha$ (построена по наблюдениям на сканирующем ИФП) и вложенное изображение выбранной области вокруг объекта #А (сумма изображений в фильтрах $F606W$ и $F814W$, полученных на телескопе Hubble Space Telescope (HST)). Карта в эмиссионной линии $H\alpha$: положение Объекта #А отмечено черным кружком, который соответствует PSF изображения ($PSF = 2''$). Изображение HST: красный звездой отмечен Объект #А, желтыми звездами отмечены другие близкие кандидаты в звезды О-типа, находящиеся в изучаемой области галактики. Белым кружком отмечена область, соответствующая пространственному разрешению карты $H\alpha$. Обратите внимание, что только одна яркая звезда обнаружена на карте HST в предполагаемых границах туманности, окружающей объект #А.

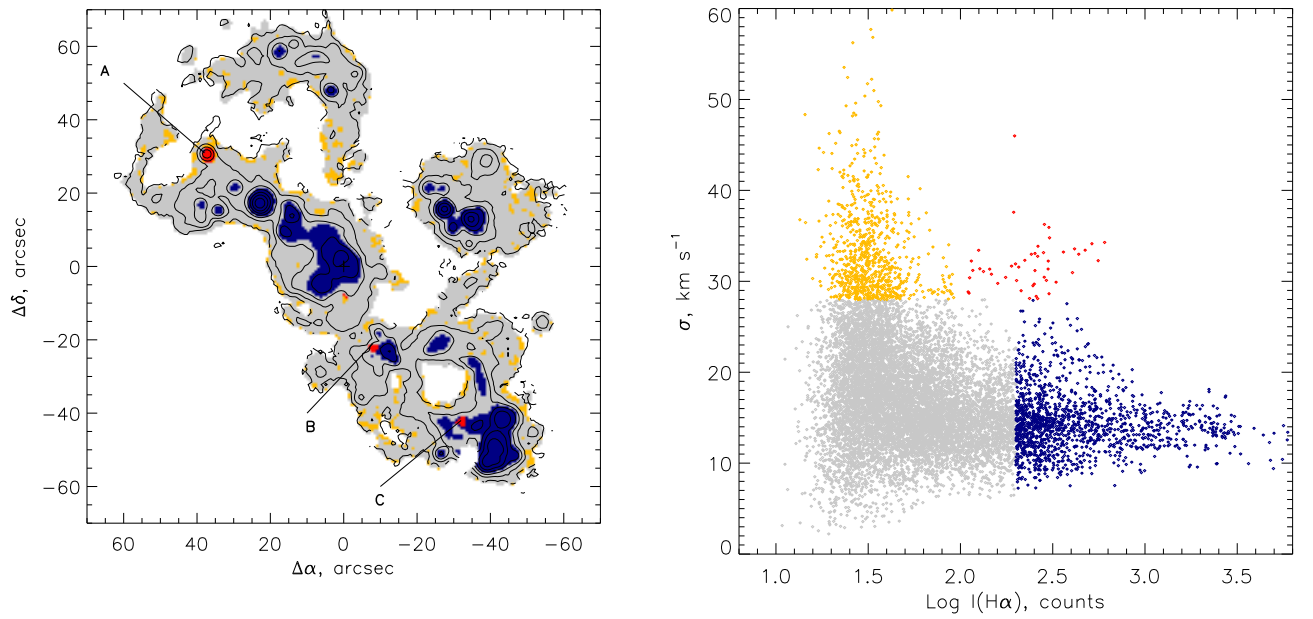


Рисунок 2.2 — Правая панель: карта NGC 4068 в эмиссионной линии $H\alpha$.

Левая панель: I- σ -диаграмма галактики NGC 4068. Цвета точек на схеме соответствуют цветам, обозначающим отдельные области на карте галактики.

Оранжевым и серым цветом отмечены области диффузного газа, синим - области H II. Объекты #A, #B, #C лежат на диагонали диаграммы (красный цвет), что означает, что они могут соответствовать расширяющимся туманностям, образованным сильными звездными ветрами массивных проэволюционировавших звезд.

2.1 Свойства объекта #А, определяемые из наблюдений

2.1.1 Наблюдательные свойства изучаемой туманности

Туманность пространственно не разрешается на изображениях, и её протяжённость в линии $\text{H}\alpha$ вдоль щели также не превышает углового разрешения спектров. Учитывая принятую дистанцию до галактики NGC 4068 ($D = 4.36$ Мпк), максимальный размер ионизованной туманности может быть оценен как 30 пк.

Объект #А первоначально привлёк внимание из-за высокой дисперсии скоростей в линии $\text{H}\alpha$ по сравнению с другими областями Н II в данной галактике (см. рис. 2.2). На рис. 2.3 представлены результаты аппроксимации профилей линии $\text{H}\alpha$ функцией Фойгта, извлечённых путём интегрирования по всей туманности и по её окрестностям (панели b и c соответственно). Расширенный профиль линии $\text{H}\alpha$ для объекта #А может быть связан с расширяющейся оболочкой, которая, в свою очередь, может быть вызвана мощным звёздным ветром центрального источника. Профили линии демонстрируют слабую асимметрию, однако их не удаётся разложить на отдельные компоненты, соответствующие приближающейся и удаляющейся сторонам пузыря. Двухкомпонентный профиль линии наблюдается на расстоянии порядка $\sim 3''$ к юго-востоку от объекта #А (панель d); широкая компонента в этом месте может быть связана с излучением за фронтом ударной волны в области взаимодействия звёздного ветра с окружающей межзвёздной средой.

Хотя напрямую измерить скорость расширения оболочки, окружающей объект #А, невозможно, её можно оценить по разности дисперсий скоростей с использованием метода, представленного в работе [104]. В случае наблюдений с использованием интерференционного фильтра IFR751 применяется следующая формула:

$$V_{\text{exp}} = k(\sigma_{\text{obs}}^2 - \sigma_{\text{ISM}}^2)^a + v_0 \quad (2.1)$$

где $\sigma_{\text{obs}} = 34$ км/с — измеренная дисперсия скоростей в линии $\text{H}\alpha$ в объекте #А, $\sigma_{\text{ISM}} = 23$ км/с — дисперсия скоростей в линии $\text{H}\alpha$ для окружающего ионизованного газа, а коэффициенты составляют $k \simeq 3,2$, $a \simeq 0,4$ и $v_0 \simeq -3,3$ (следует

отметить, что эти коэффициенты зависят от значения σ_{ISM}). В результате расчётов получаем $V_{\text{exp}} \simeq 38$ км/с.

Используя полученные значения радиуса R и скорости расширения V_{exp} , можно оценить верхний предел возраста туманности (в млн лет), приняв модель эволюции оболочки, предложенную в работе [105]:

$$t = 0,6R/V_{\text{exp}} \simeq 0,5 \quad (2.2)$$

Кинематический возраст оболочки характеризует время, прошедшее с момента начала действия мощного звёздного ветра. Полученное значение согласуется с типичными временами жизни массивных звёзд на стадиях WR или BSG.

Содержание кислорода в галактике NGC 4068 распределено неравномерно: согласно спектральным данным, полученным с использованием спектрографа SCORPIO-2, наблюдается выраженный градиент: от $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \sim 7,8$ в центральных областях до $\sim 7,5$ на периферии. Относительное содержание азота в NGC 4068 составляет $\log(\text{N}/\text{O}) = -1,6 \sim -1,3$, что типично для карликовых галактик с низкой металличностью (см., например, [73; 106]). Основываясь на этих измерениях и с учётом положения объекта #A в галактике, можно было бы ожидать, что его параметры должны соответствовать значению $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \sim 7,6$ ($Z \simeq 0,08Z_{\odot}$) и $\log(\text{N}/\text{O}) \sim -1,5$, если он является обычной областью H II.

В спектрах, полученных с использованием спектрографа SCORPIO-2, уверенно детектируются слабые авроральные эмиссионные линии, чувствительные к электронной температуре — $[\text{O III}]\lambda 4363 \text{ \AA}$ и $[\text{N II}]\lambda 5755$ (см. рис. 2.5), что позволило нам оценить химический состав, используя прямой метод (описан в главе 1). Однако линии $[\text{O II}]\lambda 3727,3729$ в этих спектрах не обнаружены, что связано с низкой чувствительностью используемого детектора в синей части спектра. Поэтому для определения содержания ионов O^+ использовались значения отношения $[\text{O II}]/[\text{N II}]$, скорректированные на межзвёздное поглощение, измеренные по спектрам TDS (см. рис. 2.6), учитывая сходные потенциалы ионизации этих ионов.

Используя пакет PYNEB [72] и коэффициенты ионизационной коррекции (ICF) для элементов N, Ne и Ar из работы [73], мы рассчитали относительное содержание четырёх элементов: O/H, N/O, Ne/O и Ar/O на основе измерен-

ных соотношений интенсивностей линий, приведённых в табл. 2. Для оценки неопределённостей был использован метод Монте-Карло с 7000 итераций, в которых потоки эмиссионных линий варьировались в соответствии с их измеренными значениями и статистическими ошибками. В ~ 5300 реализациях удалось надёжно определить температуру в зонах высокой и низкой ионизации — $T_e([\text{O III}])$ и $T_e([\text{N II}])$ соответственно.

По результатам анализа установлено, что объект #А характеризуется низким содержанием кислорода $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7,40 \pm 0,38$, что соответствует общему распределению металличности в галактике NGC 4068. В то же время, относительное содержание азота оказалось аномально высоким — $\log(\text{N}/\text{O}) = -0,04 \pm 0,27$ и значительно превышает типичные значения для галактик с низкой металличностью. Объект #А демонстрирует избыток азота в туманности по сравнению со стандартными областями H II аналогичной металличности в 20–30 раз. Относительные содержания других элементов (Ne, Ar) согласуются, в пределах ошибок, с типичными значениями, наблюдаемыми в галактиках с низкой металличностью [73; 107].

Электронная плотность туманности объекта #А согласно оценкам, полученным на основании соотношения интенсивностей линий $[\text{S II}]\lambda 6717/[\text{S II}]\lambda 6731$, рассчитанного с использованием пакета PYNEB, имеет значение $n_e \sim 120 \text{ см}^{-3}$. Однако низкая яркость линий $[\text{S II}]$ существенно увеличивает неопределённость данной оценки.

2.1.2 Свойства источника, ионизиющего туманность

На рис. 2.1 показана карта в эмиссионной линии $\text{H}\alpha$ галактики NGC 4068 и изображения, полученные на телескопе HST в фильтрах $F606W$ и $F814W$. Размер функции рассеяния точки (PSF) карты $\text{H}\alpha$, которая далее считается верхним пределом размера туманности, показан на обеих картах $\text{H}\alpha$ и HST кружками. Согласно карте, других ОБ-звезд, которые могли бы ионизовать туманность, в радиусе туманности, наблюдаемой в линии $\text{H}\alpha$, нет. Для выделения ОБ-звезд на диаграмме цвет-звездная величина (показана на рис. 2.7) мы опирались на результаты фотометрии по данным HST, опубликованные в каталоге

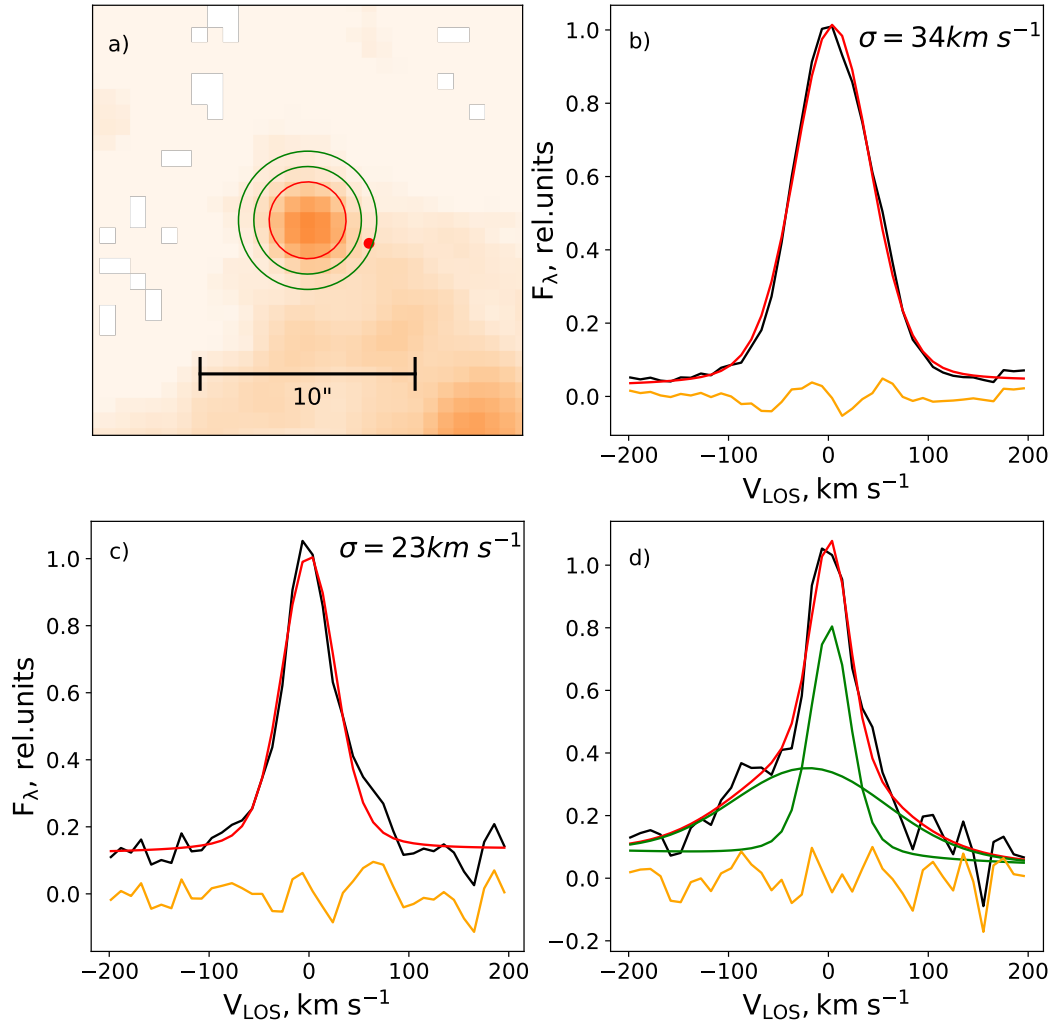


Рисунок 2.3 — Карта H α в окрестности объекта #А (панель а) и примеры профиля линии H α в данных ИФП. На панелях (b) и (c) показаны наблюдаемый профиль линии H α (черный цвет), результаты фиттирования ее одиночного компонента профилем Фойгта (красный цвет) и остатки от вычитания (желтый цвет) для спектров, проинтегрированных в пределах туманности (внутри красного кружка на панели а) и в соседней области (внутри кольца, показанного зеленым цветом на панели а). Панель (d) демонстрирует профиль линии к юго-востоку от туманности (точное положение показано красной точкой на панели а), зеленым цветом показаны отдельные компоненты. Широкий компонент может быть вызван взаимодействием звездного ветра с окружающей МЗС.

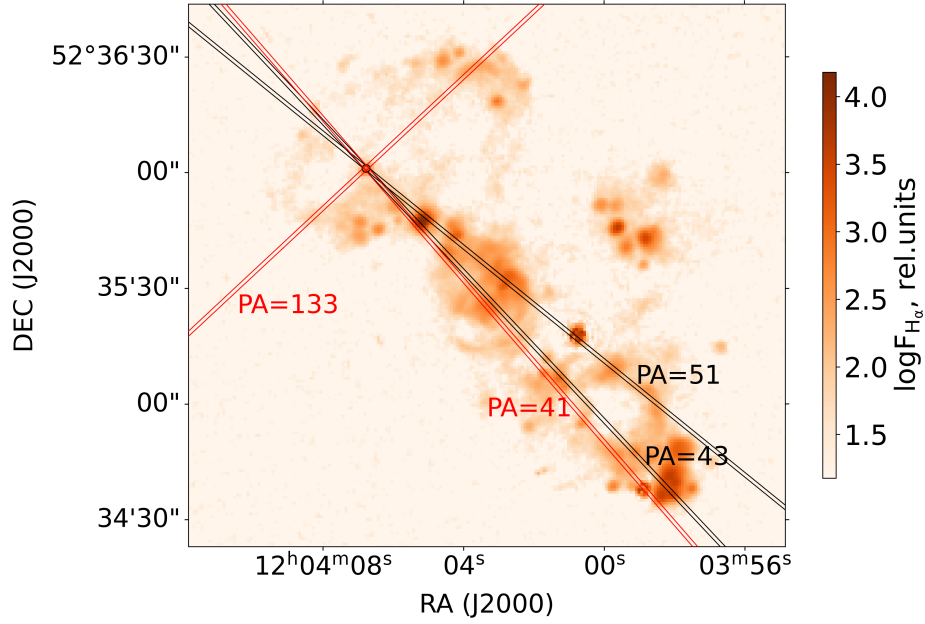


Рисунок 2.4 — Положения щелей спектрографов TDS и SCORPIO-2, наложенные на изображение NGC 4068 в эмиссионной линии $H\alpha$. Красные линии соответствуют спектрам TDS, черные — спектрам SCORPIO-2.

[92], с поправкой за Галактическое поглощение, приняв $A_{F606W} = 0,052$ mag и $A_{F814W} = 0,033$ mag [108]. Были применены те же критерии, что и в работе [109]: $M_V < -5$ mag и $-0,5 < M_V - M_I < -0,1$ mag. Данный критерий можно преобразовать в нашем случае в следующий: $m_{F606W} - 4,81$ mag и $-0,32 < m_{F606W} - m_{F814W} < -0,08$ mag; для преобразования использовался метод из работы [110] и расстояние до галактики NGC 4068, равное $D = 4.36$ Мпк). Объект #A показан на карте HST красной звездой.

Объект #A имеет следующие наблюдаемые звездные величины в фильтрах $F606W$ и $F814W$: $m_{F606W} = 21,145$ mag и $m_{F814W} = 21,709$ mag, что соответствует абсолютным звездным величинам $M_{F606W} = -7,16$ mag и $M_{F814W} = -6,52$ mag после произведенной поправки за Галактическое поглощение. Для оценки звездных величин ионизирующей звезды, свободных от вклада линий туманности, мы рассчитали вклад эмиссионных линий в фильтре $F606W$ на основе спектров, представленных на рис. 2.5, 2.6 (спектры подробно анализируются в последующих частях работы) и определили, что вклад равен 0,24 и 0,18 mag соответственно. Мы использовали среднее значение +0,21 mag, на которое скорректировали наблюдаемую величину в фильтре $F606W$ ($M_{F606W}^* = -6,89$). При этом значение звездной величины в фильтре $F814W$ существенно не менялось, так как в полосу пропускания фильтра не попадают яркие линии

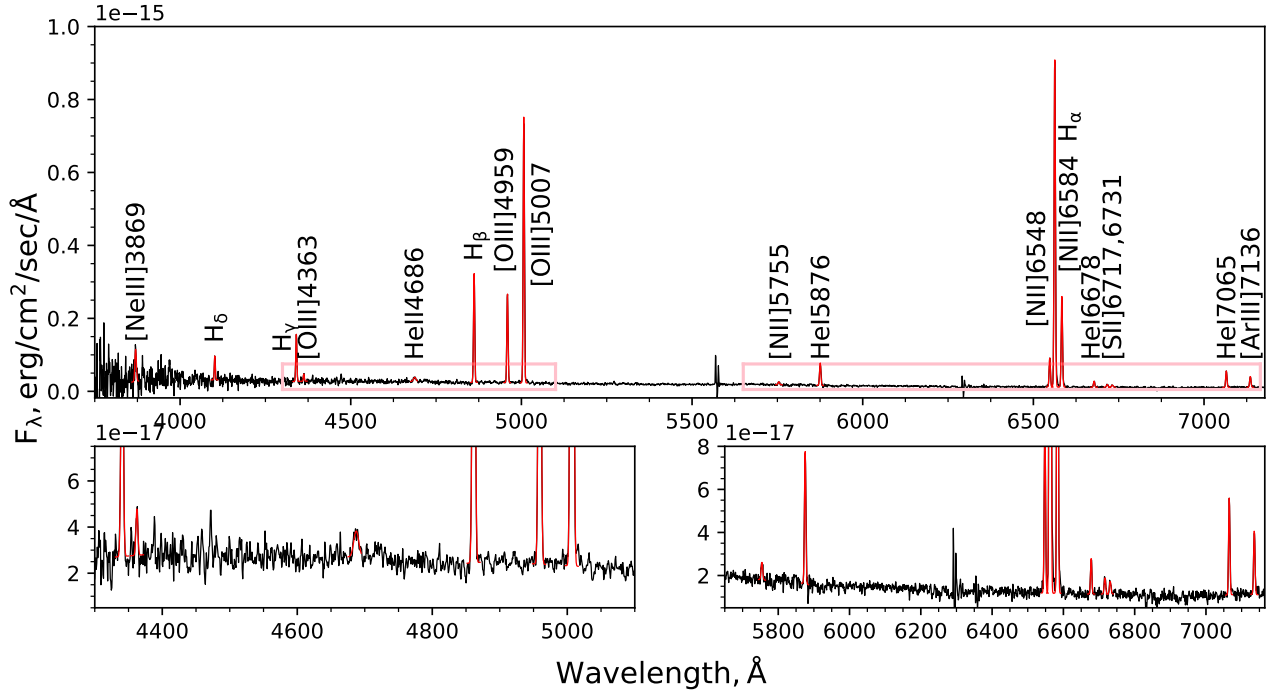


Рисунок 2.5 — Спектр SCORPIO-2/БТА, сложенный из данных двух наблюдательных ночей (показан черным). Красная линия показывает результаты проведенной гауссовой аппроксимации эмиссионных линий. В спектре наблюдается необычно низкое отношение $[S\ II]/[N\ II]$ и наличие линии $He\ II\lambda 4686$ (на нижних панелях эти особенности показаны более подробно).

туманности. Наконец, звездные величины из полос $F606W$ и $F814W$ были преобразованы в полосы системы фильтров Джонсона V и I , опираясь на работу [110]: $M_V = -6,94\ mag$ и $M_I = -6,56\ mag$. Таким образом, учет вклада ярких эмиссионных линий существенно сдвинул положение изучаемого объекта на диаграмме.

Обычно показатель цвета звезды позволяет примерно оценить ее эффективную температуру. Объект #А находится в верхнем левом углу диаграммы цвет-звездная величина (рис. 2.7), левее Главной Последовательности, в области, занятой горячими проэволюционировавшими звездами. Показатель цвета $F606W - F814W$ не чувствителен к температурам выше $T_{\text{eff}} > 25\ kK$, поэтому можно ограничить температуру объекта #А снизу величиной $25 < T_{\text{eff}}$. С другой стороны, интенсивность эмиссионной линии туманности $[O\ III]\lambda 5007\ \text{\AA}$ зависит от температуры ионизирующего источника, поэтому соотношение $[O\ III]\lambda 5007/H\beta$ можно использовать для уточнения температуры. Мы рассчитали сетку моделей туманности, ионизованной моделью абсолютно черного тела (АЧТ) с помощью фотоионизационного кода CLOUDY. При этом эффек-

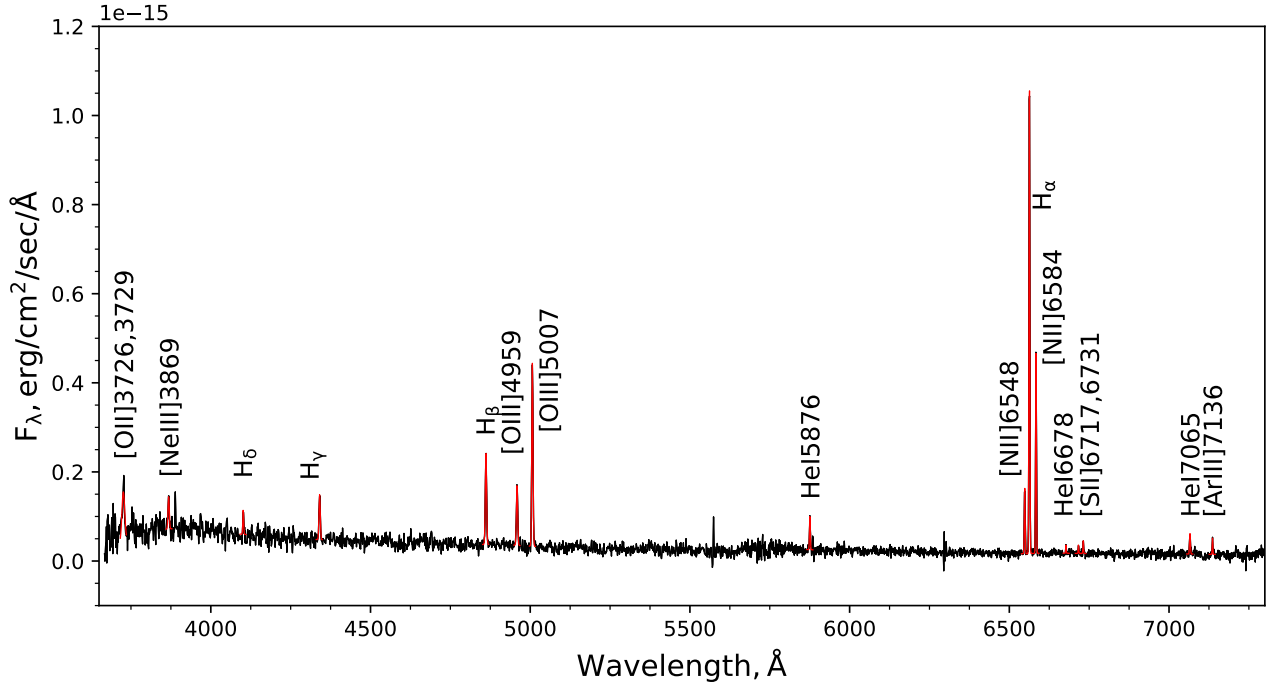


Рисунок 2.6 — Спектр, сложенный из данных, полученных на 2,5-метровом телескопе TDS/КГО (PA=41°). Обозначения цветов даны в подписи к рисунку 2.5. Линия He II $\lambda 4686$ не видна в спектре из-за меньшего отношения сигнал/шум.

тивная температура и светимость ионизирующего источника, а также электронная плотность туманности варьировались в диапазонах, близких к параметрам звезд О и В. Наши расчеты показывают, что наблюдаемое значение отношения $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ при заданных параметрах моделей не может быть получено, если температура звезды меньше значения $\log(T_{\text{eff}}) = 4,6$. ($T_{\text{eff}} \simeq 40$ kK). Это значение T_{eff} также соответствует ближайшему положению на эволюционном треке звезды $80M_{\odot}$ к объекту #А на диаграмме цвет-величина (рисунок 2.7). В дальнейшем эта величина принята за эффективную температуру звезды, ионизирующей изучаемую туманность.

Опираясь на приведенные выше измерения M_V , получена оценка болометрической абсолютной звездной величины и светимости ионизирующего источника в объекте #А: $M_{\text{bol}} = -10,74$ mag и $L_* = 1,5 \times 10^6 L_{\odot}$. Для этого использовалась болометрическая поправка для звезд О-типа (О3 I), имеющих эффективную температуру $T_{\text{eff}} = 42,2$ kK, из работы [111].

Необходимо отметить, что в измеренные звездные величины вносилась поправка только за галактическое поглощение, но полученные нами длинноволновые спектры указывают на более высокое значение поглощения на лу-

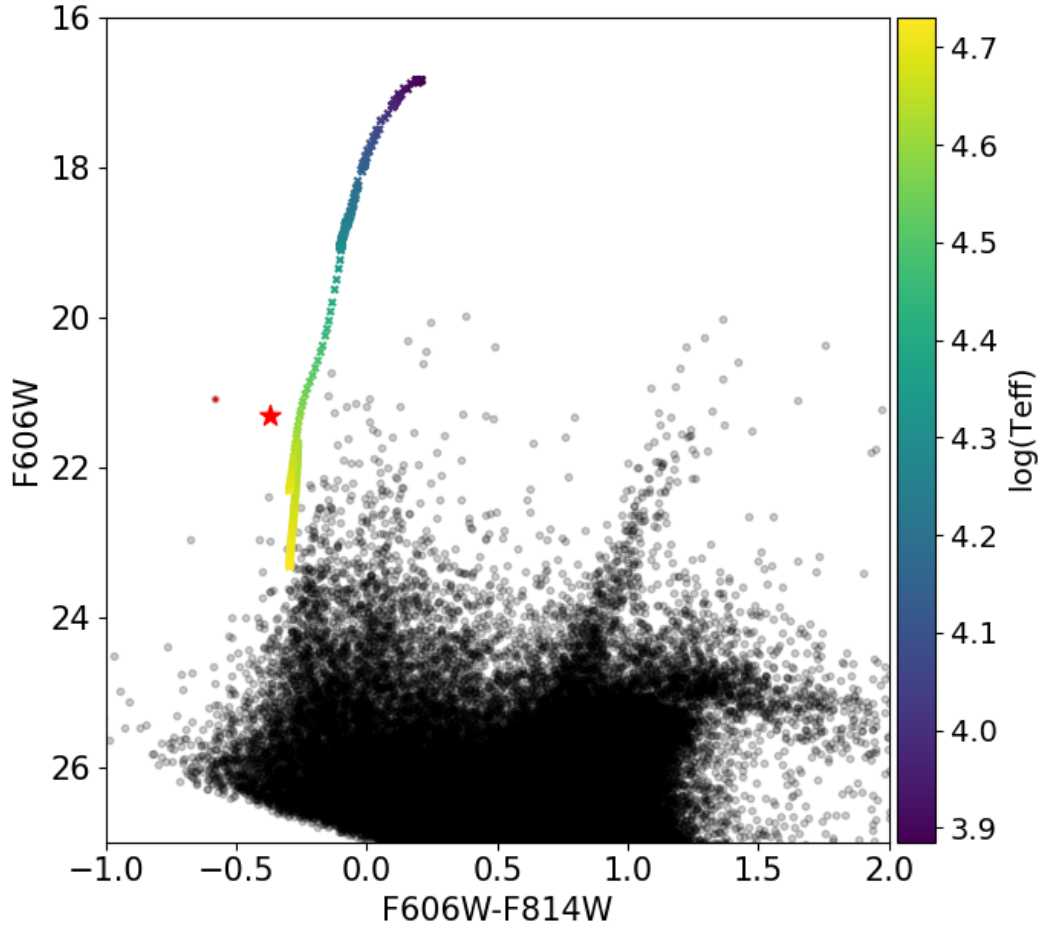


Рисунок 2.7 — Диаграмма цвет-величина, построенная для галактики NGC 4068 в полосах HST $F606W$ и $F814W$. Положение объекта #A отмечено на диаграмме красной звездой, а красная точка соответствует значениям до поправки за вклад эмиссионных линий туманности. Цветными точками показан Женевский эволюционный трек [24] звезды с массой $80M_{\odot}$, цвет соответствует эффективной температуре звезды.

че зрения объекта #А, значительно превышающее поглощение в других областях Н II в галактике NGC 4068. Повышенное поглощение может быть связано, например, с локализованным пылеобразованием в объекте #А. Таким образом, полная светимость ионизирующей звезды, вероятно, занижена. Учитывая, что обычно звездный континуум меньше подвержен влиянию пыли, чем газ ($E(B - V)_* \simeq 0.44E(B - V)_{\text{gas}}$ по данным [112]), соответствующие значения поглощения в используемых фильтрах *HST* составят $A_{F606W} = 0,14 \text{ mag}$ и $A_{F814W} = 0,08 \text{ mag}$. Использование этого значения поглощения почти не повлияет на представленные выше оценки цвета $V - I$, но несколько увеличит болометрическую светимость: на 0,14 mag, что приведет к итоговому значению $L_* = 1,7 \times 10^6 L_{\odot}$.

2.2 Возможные объяснения наблюдательных свойств объекта #А

Оцененная нами светимость объекта #А очень высока, поэтому мы сначала проверили, не является ли он группой звезд. Изображения окружающей области на карте *HST* показывают, что объект #А представляет собой один звездоподобный объект, а не небольшое скопление звезд. Наблюдения объекта с помощью спектрографа TDS проводились под разными позиционными углами (см. рис. 2.4), при этом полученные спектры идентичны, что также исключает ионизацию туманности скоплением. Таким образом, далее центральная звезда объекта #А рассматривается как единичный объект.

Спектр объекта #А очень похож на спектр некоторых планетарных туманностей. Например, спектр одной планетарной туманности в бедной металлами галактике Sextans В демонстрирует отношения потоков эмиссионных линий [S II] и [N II], аналогичные измеренным нами значениям для объекта #А (объект описан в работе [113]). Однако, по сравнению с планетарными туманностями, объект #А демонстрирует очень яркую эмиссионную линию [O III] λ 5007. Светимость в этой линии на порядок превышает эмпирический верхний предел потока, установленный для планетарных туманностей [см. работы 114; 115]. Следовательно, объект #А не может быть ни планетарной туманностью, ни бо-

Таблица 2 — Отношения потоков в эмиссионных линиях с учетом поправки за покраснение, измеренные по двум спектрам туманности (SCORPIO-2/БТА и TDS/КГО). Коррекция покраснения выполнялась с использованием Бальмеровского декремента, полученного из спектра SCORPIO-2/БТА.

Line	$F_{\text{СМО}} (PA=41^\circ)$	$F_{\text{БТА}} (\text{combined})$
[O II] λ 3727/H β	1.3 ± 0.2	—
[Ne III] λ 3869/H β	0.39 ± 0.09	0.5 ± 0.1
He II λ 4686/H β	< 0.12	0.07 ± 0.02
[O III] λ 4363/H β	—	0.05 ± 0.03
[O III] λ 4959/H β	0.63 ± 0.05	0.82 ± 0.01
[O III] λ 5007/H β	1.83 ± 0.09	2.45 ± 0.03
[N II] λ 5755/H β	—	0.034 ± 0.009
He I λ 5876/H β	0.22 ± 0.03	0.231 ± 0.007
[N II] λ 6548/H β	0.41 ± 0.03	0.225 ± 0.007
H α λ 6563/H β	2.99 ± 0.15	2.86 ± 0.03
[N II] λ 6583/H β	1.25 ± 0.07	0.78 ± 0.01
He I λ 6678/H β	0.036 ± 0.016	0.051 ± 0.005
[S II] λ 6716/H β	0.04 ± 0.02	0.041 ± 0.008
[S II] λ 6731/H β	0.06 ± 0.02	0.03 ± 0.01
He I λ 7065/H β	0.13 ± 0.03	0.133 ± 0.006
[Ar III] λ 7136/H β	0.07 ± 0.02	0.086 ± 0.007

лее экзотическим типом туманности с центральной звездой типа [WR] (такие объекты описаны, например, в работе [116]).

Учитывая высокую светимость объекта, его положение на диаграмме цвет-звездная величина, яркую линию [O III] λ 5007 и значительный переизбыток азота в туманности, мы выдвинули гипотезу об ионизации туманности массивной звездой (с массой $M_* = 70 - 80M_\odot$) на поздней стадии эволюции. Подходящие объекты — звезды BSG, LBV или WR. Оцененные параметры туманности (размер, V_{exp} , светимость) согласуются с гипотезой ее ионизации массивной звездой. Звезда WR, вероятно, способна вызвать наблюдаемый выброс азота из своей звездной атмосферы. Кроме того, оцененный кинематический возраст расширяющейся туманности вокруг объекта #A согласуется с типичной продолжительностью фазы WR (которая составляет $\sim 0,4$ млн лет по данным [117]).

2.3 Моделирование наблюдаемой туманности

Модели спектра объекта #А строились, исходя из предположения, что объект является сферической туманностью, ионизованной массивной одиночной звездой с мощным ветром. В предыдущих разделах показано, что этот сценарий согласуется с данными наблюдений и оценками параметров эмиссионной туманности и ионизирующей звезды.

Моделирование проводилось в два этапа. На первом этапе (раздел 2.3.1) моделировался спектр ионизирующей звезды с помощью кода `smfgen` [78]. Этот спектр затем использовался на следующем этапе в качестве источника ионизации для модели туманности CLOUDY (раздел 2.3.2).

2.3.1 Моделирование спектра звезды, ионизирующей туманность

Как описано в предыдущих разделах, оценки светимости L_* и эффективной температуры T_{eff} центральной звезды были получены на основе фотометрии HST и диаграмм цвет-звездная величина. Это позволило определить положение объекта #А на диаграмме Герцшпрунга–Рассела (ГР) (рис. 2.8). На следующем этапе были получены химическое содержание и физические свойства центральной звезды на основе эволюционных треков, рассчитанных с помощью [24] и [25], которые различаются методом масштабирования содержания тяжелых элементов при понижении металличности.

В работе [24] были рассчитаны эволюционные треки звезд в широком диапазоне начальных масс со значением металличности, соответствующей полученной нами оценке для галактики NGC 4068. Согласно расчетам, бедные металлами звезды после окончания горения водорода в ядре становятся холоднее и движутся по эволюционному треку в правую часть диаграммы ГР (левая панель рисунка 2.8). Важно отметить, что, в отличие от звезд солнечной металличности, бедные металлами массивные звезды больше не возвращаются в левую часть диаграммы, даже если в моделях учитываются эффекты вращения звезд. Поэтому наиболее подходящим моментом, когда звезда уже может

Таблица 3 — Параметры моделей звезд, построенных с помощью кода CMFGEN в качестве центрального источника.

	Geneva Tracks			Stromlo Tracks		
	Model BSG ₁	Model BSG ₂	Model BSG ₃	Model WR ₁	Model WR ₂	Model WR ₃
age (млн лет)	3.41	3.41	3.7	3.87	3.70	3.61
M_{init} ($M_{\odot}$)	80	80	80	80	75	80
M_* ($M_{\odot}$)	74.33	74.33	73.11	50.97	44.07	47.83
$\log g$	3.48	3.48	3.82	3.163	3.375	3.356
L_* ($10^6 L_{\odot}$)	1.7	1.7	1.95	2.214	1.755	1.954
$\log (L_*/L_{\odot})$	6.23	6.23	6.29	6.345	6.24	6.29
$\dot{M}$ ($M_{\odot}/\text{год}$)	$2.20 \cdot 10^{-5}$	$2.20 \cdot 10^{-5}$	$2.708 \cdot 10^{-5}$	$5.70 \cdot 10^{-5}$	$3.73 \cdot 10^{-5}$	$4.46 \cdot 10^{-5}$
$\log T_{\text{eff}}$	4.61	4.61	4.71	4.60	4.65	4.64
V/V_{crit}	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2
V_{∞} (км/с)	2760	2760	3360	1267	1147	1275
f	1.0	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1
Содержание тяжелых элементов (массовая доля)						
H centr	9.6	9.6	0	0	0	0
He centr	90.2	90.2	99.8	3.8	17.8	16.1
H _{surf}	0.56	0.56	0.48	0.29	0.34	0.32
He _{surf}	0.43	0.43	0.51	0.70	0.65	0.67
$^{12}\text{C}_{\text{surf}}$	$1.23 \cdot 10^{-4}$	$1.23 \cdot 10^{-4}$	$9.88 \cdot 10^{-5}$	$3.44 \cdot 10^{-5}$	$5.28 \cdot 10^{-5}$	$4.48 \cdot 10^{-5}$
$^{14}\text{N}_{\text{surf}}$	$7.59 \cdot 10^{-4}$	$7.59 \cdot 10^{-4}$	$8.44 \cdot 10^{-4}$	$2.86 \cdot 10^{-3}$	$2.71 \cdot 10^{-3}$	$2.77 \cdot 10^{-3}$
$^{16}\text{O}_{\text{surf}}$	$3.25 \cdot 10^{-4}$	$3.25 \cdot 10^{-4}$	$2.60 \cdot 10^{-4}$	$5.22 \cdot 10^{-5}$	$2.06 \cdot 10^{-4}$	$1.48 \cdot 10^{-4}$

начать терять внешние оболочки, но еще достаточно горячая, является окончание горения водорода в ядре и начало стадии голубого сверхгиганта (BSG). На рисунке 2.8 показаны точки, являющиеся вероятным текущим эволюционным положением центральной звезды.

По эволюционным трекам был получен химический состав (содержание H, He, C, N, O), $\log g$, массу M_* , светимость L_* , температуру T_{eff} и радиус. Содержание кремния Si, серы S и железа Fe были установлены на уровне 0,1 от солнечного. Скорость ветра рассчитывалась по формуле из работы [118]:

$$V_{\infty} = 2.65 \cdot V_{\text{esc}} \quad (2.3)$$

где V_{esc} это скорость убегания. Темп потери массы $\dot{M}$ был посчитан как описано в работе [119]:

$$\begin{aligned} \log \dot{M} = & -6.697 + 2.194 \log (L_*/10^5) - 1.313 \log (M_*/30) - \\ & - 1.226 \log \left(\frac{V_{\infty}/V_{\text{esc}}}{2.0} \right) + 0.933 \log (T_{\text{eff}}/40000) - \\ & - 10.92 \{ \log (T_{\text{eff}}/40000) \}^2 . \quad (2.4) \end{aligned}$$

Мы использовали параметры, сведенные в Таблице 3, в качестве вводных параметров для кода расчета звездной атмосферы CMFGEN (код описан в работе [78]). В результате был получен модельный спектр в абсолютных единицах потока, охватывающий весь спектральный диапазон (см. рисунок 2.9).

В другой работе ([25]) была рассчитана сетка эволюционных треков массивных звезд в широком диапазоне металличности с помощью кода Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA) (код описан в работе [120]). В этой работе авторы впервые применили шкалирование содержания тяжелых элементов на низкую металличность в согласии с моделью содержания элементов Galactic Concordance Abundances вместо солнечного содержания элементов, масштабированного солнечного содержания или содержания с увеличением концентрации альфа-элементов. На правой панели рисунка 2.8 представлены эволюционные треки из работы [25] для $\text{Fe}/\text{H} = -0.8$. Как видно из правой панели рисунка 2.8, после Главной Последовательности звезды с начальной массой $M_* > 70M_{\odot}$ и вращением $V/V_{\text{crit}} = 0.2$ перемещаются вправо, а затем поворачивают налево в

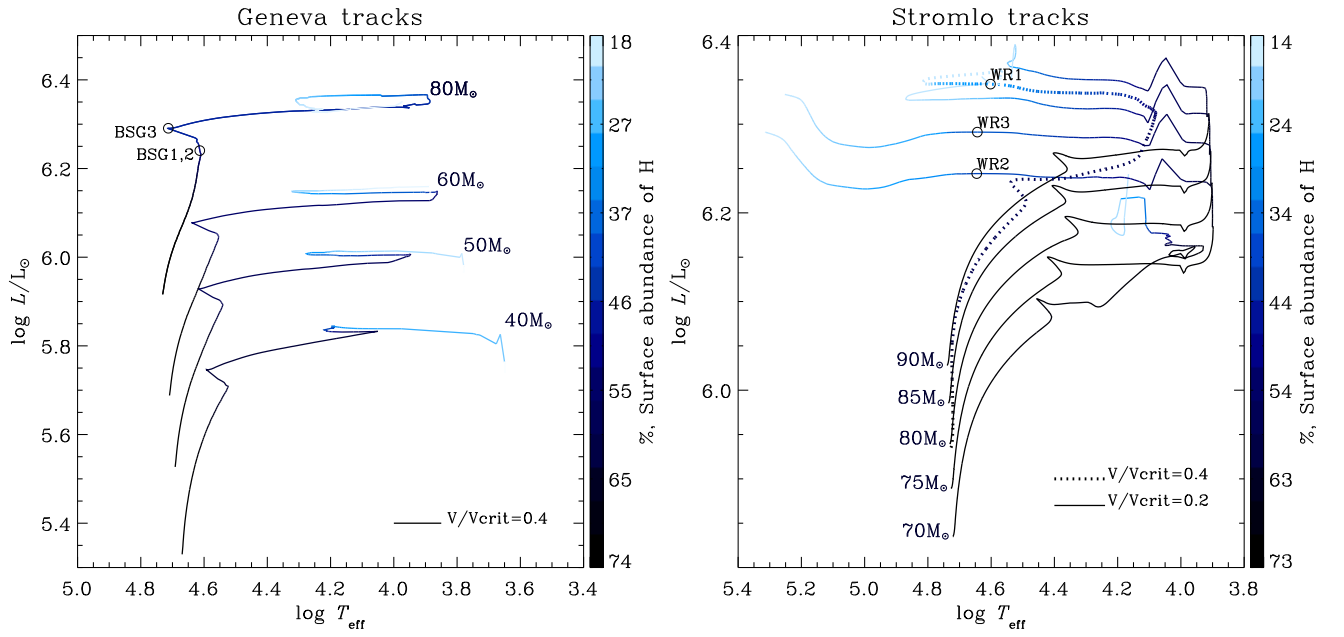


Рисунок 2.8 — Диаграмма ГР и эволюционные треки массивных звезд с низкой металличностью ($Z=0,002$) из эволюционных моделей [24] (левая панель) и [25] (правая панель). Черными кружками отмечены точки, принятые за источники ионизации для дальнейшего моделирования. Женевские треки (из [24]) не производят массивных звезд WR с такой низкой металличностью, тогда как треки из [25] демонстрируют совершенно другой эволюционный путь и производят звезды WR с $M > 70M_{\odot}$.

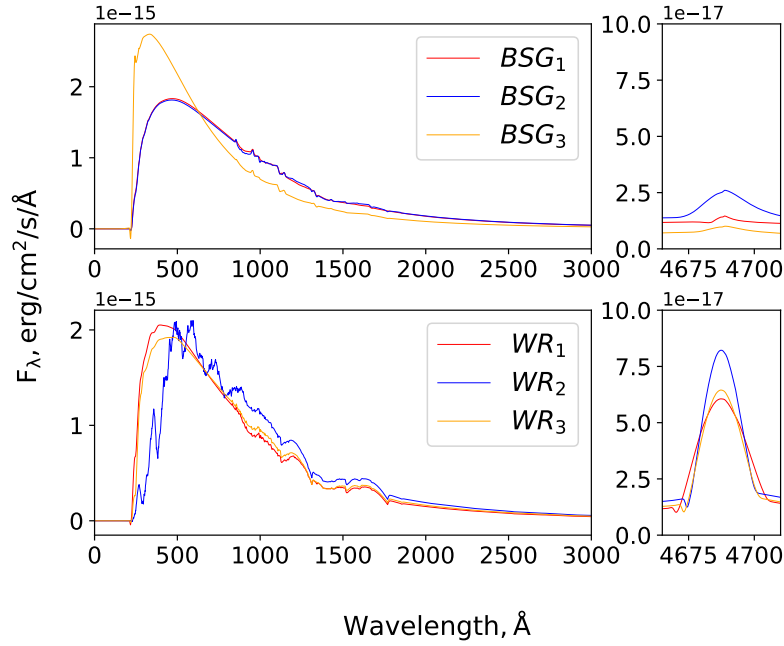


Рисунок 2.9 — Левая панель: спектральные распределения энергии, рассчитанные для разных моделей центральной звезды. Правая панель: интенсивность линии He II $\lambda 4686$ в разных моделях. Только звезды типа WR имеют в своих модельных спектрах достаточно яркую линию He II $\lambda 4686$.

область звезд WR. Треки же из классической работы [24] не позволяют получить модельные звезды WR большой массы с низкой металличностью.

Мы рассчитали спектры звезд с массой $M_{\text{init}}=75$ и $80 M_{\odot}$ с $V/V_{\text{crit}} = 0,2$ и $0,4$. При этом содержание H, He, C, N, O, Fe, Si, S, а также параметры ветра V_{∞} и $\dot{M}$ были получены из эволюционных треков (см. Таблицу 3). Коэффициент заполнения был установлен на уровне $f = 0,1$ для всех моделей звезд WR.

Еще один набор эволюционных треков был предложен в работе [26] для звезд с низкой металличностью и быстрым вращением, приводящим к эффективному перемешиванию вещества и, следовательно, к химически-однородной эволюции. Такие объекты должны иметь практически неизменное содержание азота на стадии горения водорода, имея при этом высокие эффективные температуры [26; 121], и поэтому перемещаться в левую часть диаграммы ГР. Поскольку получены указания на значительный избыток азота в объекте #A по сравнению с его родительской галактикой, мы можем заключить, что объект не претерпевает такого рода химически-однородной эволюции. Поэтому эти модели далее не рассматривались.

Таблица 4 — Сетка параметров моделей туманности

	минимальное значение	максимальное значение	шаг
$R_{\max}[\text{pc}]$	6.4	22.6	3.24 - 1.62
$\log(n_e) [\text{cm}^{-3}]$	0.8	2.2	0.2 - 0.1
$\log(N/O)$	-1.5	0.6	0.4 - 0.1

2.3.2 Модели туманности, полученные с помощью кода CLOUDY

После расчета спектра центрального источника были построены модели спектра окружающей туманности. Для этого использовался фотоионизационный код CLOUDY [75; 76] (версия 17.01) и пакет PYCLOUDY [77], который работает с вводом и выводом файлов кода CLOUDY.

Для каждой из шести моделей центрального источника (BSG_1 , BSG_2 и т.д.) была рассчитана сетка моделей CLOUDY с варьирующимся содержанием азота (а именно, $\log(N/O)$), плотностью и внешним радиусом туманности. Параметры варьировались в диапазонах, указанных в Таблице 4. Диапазон плотности водорода был выбран исходя из типичной плотности областей H II, а также туманностей вокруг звезд WR ($50 - 100 \text{ cm}^{-3}$).

Параметры модели звезды использовались для задания светимости T_{eff} и спектрального распределения энергии центрального источника ионизации. Металличность туманности принята равной металличности галактики NGC 4068 в окрестностях объекта #A: $Z = 0,1 Z_{\odot}$. В таблице 5 указано содержание химических элементов, которое использовалось в наших расчетах. Содержания элементов, за исключением азота и гелия, были масштабированы с коэффициентом 0.1, чтобы соответствовать металличности родительской галактики NGC 4068. В рассматриваемых моделях используется замкнутая сферическая геометрия туманности с внутренним радиусом 3 пк и коэффициентом объемного заполнения $f = 0,15$. Такое значение внутреннего радиуса было выбрано исходя из типичных размеров туманностей вокруг звезд WR (см., например, [122]). Варьирование внутреннего радиуса в пределах $0,3 - 3$ пк не оказывает влияния на результаты моделирования, поэтому внутренний радиус не варьировался.

Для оценки параметров объекта #A мы сравнили спектры CLOUDY со спектрами, сложенными из двух спектров SCORPIO-2. Этот спектр имеет луч-

Таблица 5 — Содержание химических элементов $\log(X/H)$ в моделях туманности, где X/H — содержание элемента по отношению к водороду. Для азота указано исходное значение. Значение металличности галактики задано равным $Z=0,1 Z_{\odot}$, данные значения масштабированы на эту металличность.

He	-1.022	C	-4.523	N*	-4.456	O	-4.398
Ne	-5.222	Na	-7.523	Mg	-6.523	Al	-7.699
Si	-6.398	P	-7.796	S	-6.0	Cl	-8.0
Ar	-6.523	Ti	-7.9788	Fe	-6.523	Ni	-8.0

шее соотношение сигнал/шум, чем спектры TDS. В нем также присутствует эмиссионная линия He II4686, которая является важной для определения типа ионизирующего источника, но не обнаружена в спектрах TDS из-за низкого отношения S/N .

2.4 Результаты моделирования

2.4.1 Критерий отбора моделей

Для выбора наиболее удачных моделей использовался классический критерий χ^2 , учитывающий потоки в эмиссионных линиях, перечисленных в таблице 6. Мы пользовались следующим соотношением:

$$\begin{aligned} \sum_N \chi^2 = & \sum_{wl \leq 5007} \left(\frac{F_o/H_{\beta o} - F_m/H_{\beta m}}{\delta(F_o/H_{\beta o})} \right)^2 + \\ & + \sum_{wl \geq 5007} \left(\frac{F_o/H_{\alpha o} - F_m/H_{\alpha m}}{\delta(F_o/H_{\alpha o})} \right)^2, \text{ где} \\ \delta(F_o/H_{i o}) = & \sqrt{(\delta F_o/H_i)^2 + (\delta H_i \cdot F_o/H_i^2)^2}, i = \alpha, \beta, \end{aligned}$$

F_o, F_m — потоки в эмиссионных линиях наблюдаемых и модельных спектров соответственно; $H_{\beta o}, H_{\alpha o}$ — наблюдаемые потоки в линиях $H\beta$ и $H\alpha$; $H_{\beta m}, H_{\alpha m}$ — модельные потоки в этих линиях; N — общее количество эмиссионных линий, ис-

пользованных для сравнения моделей. Выбранные веса δF_o и δH_i соответствуют неопределенностям измеренных потоков (см. Таблицу 2). Финальное значение χ^2 равно

$$\chi^2 = \frac{\sum_N \chi^2}{N}.$$

Заметим, что линия He II $\lambda 4686 \text{ \AA}$ была исключена из расчета χ^2 и рассматривалась отдельно, поскольку она, вероятно, связана со звездной атмосферой, а не с туманностью.

2.5 Выбор наилучшей модели

Наилучшее согласие модельного спектра с наблюдаемым было достигнуто для моделей туманностей, ионизованных звездами BSG1, BSG2, WR3 и WR1 (см. Рис. 2.10). Среди них только спектры туманностей, ионизованных звездами WR, демонстрируют достаточно яркую линию He II. Однако отметим, что во всех полученных моделях CLOUDY линия He II, относящаяся к излучению туманности, более слабая, чем в наблюдаемом спектре, и лишь дополнительный вклад от излучения самой центральной звезды приводит к воспроизведению наблюдаемого потока в линии He II. Таким образом, наши модели показывают, что наблюдаемая линия He II, вероятно, рождается в атмосфере центральной звезды, а не окружающей туманности.

Кроме того, значительный избыток азота, воспроизводимый моделями, характерен для звезд WR, которые обычно выбрасывают металлы в окружающую МЗС. Для моделей туманностей, ионизованных модельными звездами WR1 и WR3, существуют два узла сетки модели с разными значениями $\log(N/O)$, где χ^2 сходится к минимуму. Мы построили более мелкие модельные сетки для туманностей, ионизованных этими звездами, учитывая содержание азота, варьирующееся в районе $\log(N/O) = 0$, и получили хорошее согласие между нашими моделями и наблюдаемым спектром, включая поток в линии He II. Подводя итог, мы считаем наиболее достоверными модели туманностей, ионизованные модельными звездами WR1 и WR3. Использование источников ионизации WR1 и WR3 приводит к схожим результатам моделирования спектра туманности. Ниже будет рассматриваться только модель, построенная с использованием звезды

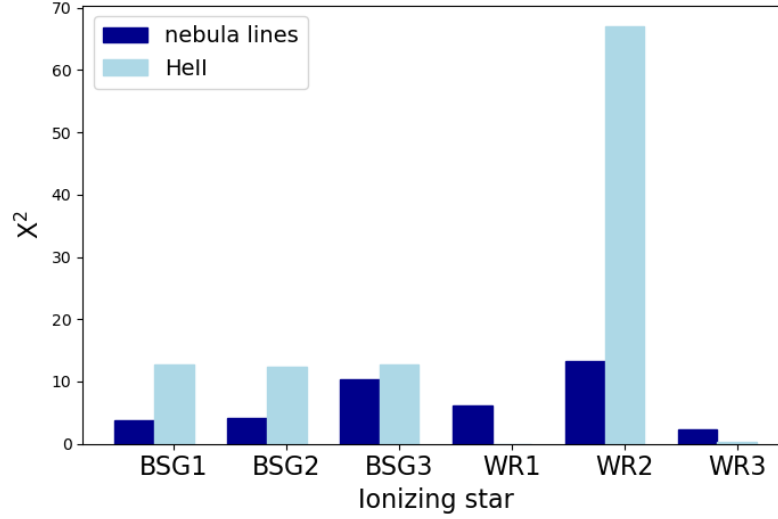


Рисунок 2.10 — Сравнение значений χ^2 , полученных для эмиссионных линий туманности (χ^2 нормировано на количество линий) и χ^2 линии He II моделей объекта #A. Звезды BSG1, BSG2, WR1 и WR2 лучше воспроизводят эмиссионные линии туманности, чем звезды BSG3 и WR2. Но звезды WR, согласно нашему моделированию, значительно лучше воспроизводят линию He II, которую излучает звезда. Так как линия He II очень важна для диагностики состояния МЗС, далее для оценки параметров звезды, ионизирующей наблюдаемую туманность, используются звезды WR1 и WR3.

WR3 в качестве образца ионизирующего источника, так как данная модель лучше воспроизводит потоки в основных эмиссионных линиях.

2.5.1 Параметры модели, демонстрирующей наилучшее согласие с наблюдениями

Значения χ^2 для каждой линии модельной туманности, демонстрирующей наилучшее согласие с наблюдениями, приведены в таблице 6. Сравнение спектра этой модели со спектром, полученным на SCORPIO-2, показано на рисунке 2.12. Значения параметров модели туманности с наименьшей суммой квадратов отклонений χ^2 следующие: $R_{\max} = 15$ пс, $\log(N/O) = 0,15$, $\log(n_e) = 1,9$ см⁻³. Данная модель показывает хорошее согласие с содержанием азота в туманности, полученным на основе наблюдений ($\log(N/O) = -0,04 \pm 0,27$).

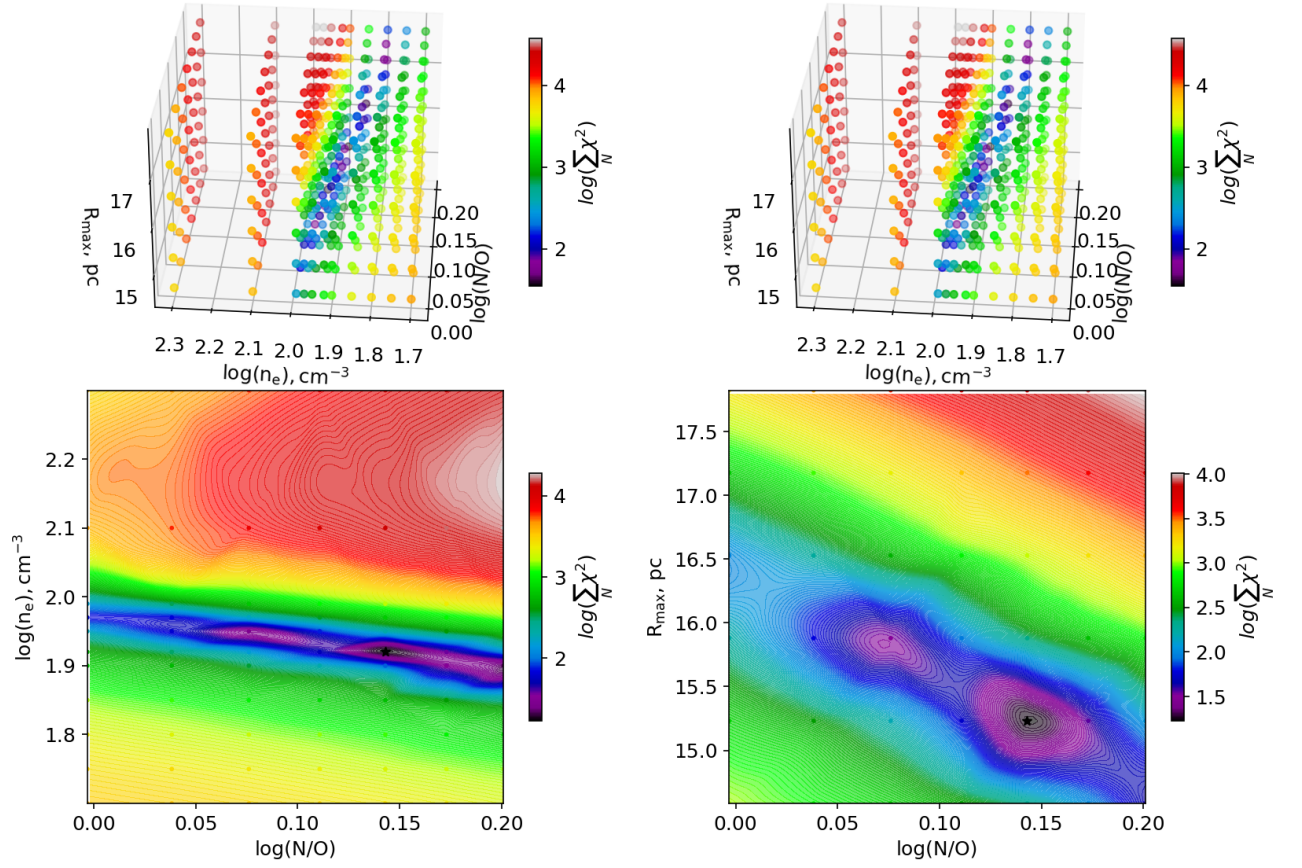


Рисунок 2.11 — Сетки моделей CLOUDY для туманности, ионизованной звездой WR3, с разным разрешением. Верхняя панель: правый график показывает сетку с низким разрешением, левый график показывает более мелкую сетку в пространстве параметров вокруг минимального значения $\log(\sum_N \chi^2)$. Нижняя панель: на графиках показаны фрагменты более мелкой сетки модели, пересекающие минимальное значение χ^2 . Цвет соответствует величине $\log(\sum_N \chi^2)$.

Таблица 6 — χ^2 для рассматриваемых линий наилучшей спектральной модели туманности, ионизованной звездой WR3.

λ	χ^2	λ	χ^2
He II $\lambda 4686$	0.3	[O III] $\lambda 4363$	0.001
[O III] $\lambda 5007$	0.02	He I $\lambda 5876$	0.5
[N II] $\lambda 6583$	1.1	He I $\lambda 6678$	0.4
[S II] $\lambda 6716$	0.2	[S II] $\lambda 6731$	0.004
He I $\lambda 7065$	19.0	[Ar III] $\lambda 7136$	10.1

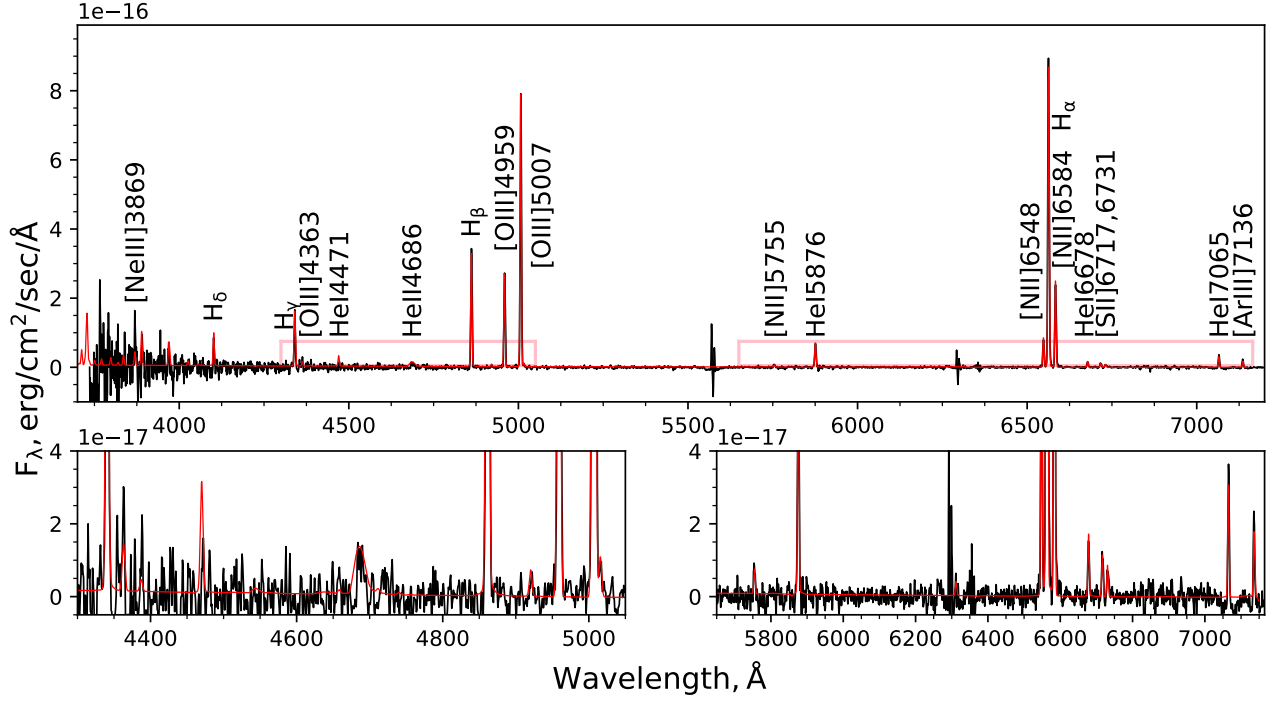


Рисунок 2.12 — Черным цветом показан спектр туманности, полученный в наблюдениях на SCORPIO-2. Красным цветом показана наилучшая модель туманности. Линии в модельном спектре свернуты с гауссианой для визуального сравнения с наблюдениями. Наилучшая модель имеет следующие параметры: ионизирующая звезда WR3; параметры туманности: $R_{\max} = 15$ пк, $\log(N/O)=0,15$, $\log(n_e)=1,9 \text{ cm}^{-3}$.

Модельный спектр туманности, ионизованной звездами WR1 и WR3, где линия He II полностью формируется в атмосфере звезды, хорошо согласуется с наблюдениями. Для моделей туманностей со звездами BSG1 или BSG2 в качестве источников ионизации не наблюдается заметной линии He II, что объясняется более низким содержанием гелия. Помимо содержания гелия, линия He II $\lambda 4686$ в атмосфере звезд также чувствительна к темпу потери массы $\dot{M}$. Следовательно, увеличить интенсивность линии He II $\lambda 4686$ в модельном спектре можно было бы за счет увеличения параметра $\dot{M}$. В модели звезды BSG1 $\dot{M}$ был оценен согласно уравнению 2.4 из [119]. Однако [123] и [124] показывают, что скорость потери массы массивных звезд обычно ниже, чем предсказано в работе [119]. Таким образом, нет физических причин увеличивать модельное значение $\dot{M}$ для BSG1 и можно заключить, что модели WR1 и WR3 являются оптимальными моделями ионизирующего источника.

2.6 Природа ионизации туманности согласно построенным моделям

Хотя оба класса моделей центрального источника в объекте #А (BSG и WR) позволяют воспроизвести основные особенности наблюдаемого спектра, мы отдаем предпочтение сценарию ионизации наблюдаемой туманности звездой типа WR из-за наличия линии He II в спектре и измеренного значительного избытка содержания азота в туманности. Звезды WR формируются через несколько каналов:

- 1) по каналу эволюции одиночной звезды (так называемый сценарий Конти, описанный в работе [125]), при котором звезда теряет значительную часть своей массы во время фазы LBV [126];
- 2) как один из компонентов двойной системы после события переноса массы [127].

Второй сценарий становится определяющим в среде с низкой металличностью, где звездный ветер слабее [128]. В нашей работе использовалось простейшее предположение о том, что центральный источник объекта #А — это одиночная массивная звезда на поздней эволюционной стадии. Хорошее согласие наблюдаемых и модельных спектров подтверждает эволюционные предсказания [25] и возможность образования звезд типа WR в среде с низкой металличностью.

Значительный переизбыток азота, обнаруженный в объекте #А, указывает на то, что наблюдается выброшенное за время эволюции звездное вещество, а не окружающий газ, ионизированный центральной звездой. В этом сценарии широкий компонент профиля линии $H\alpha$, наблюдаемый сразу за объектом #А (показан на рис. 2.3), может быть связан с излучением за фронтом ударной волны, возникающим в результате взаимодействия звездного ветра с окружающей МЗС. Переизбыток азота часто наблюдается в связи со звездами WR (например, см. работу [129]), а исследования галактических туманностей вокруг звезд WR часто связывают высокое отношение N/O с выбросами вещества [130—132].

Также необходимо упомянуть о возможной спектральной переменности объекта #А. В работе использовано несколько спектров, полученных на разных приборах с интервалом в несколько лет. Как видно из таблицы 2, полученные

отношения потоков линий низкого и высокого возбуждения к бальмеровским линиям (а именно, $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ и $[\text{O III}]/\text{H}\beta$) различаются в приведенных спектрах. Чтобы оценить, может ли эта разница быть обусловлена инструментальными эффектами, такими как влияние атмосферной дисперсии, или неравномерным вкладом фонового диффузного ионизованного газа, мы провели в декабре 2020 г. несколько дополнительных наблюдений с помощью длиннощелевого спектрографа TDS на 2,5-м телескопе КГО с разными позиционными углами. Все отдельно снятые экспозиции спектров демонстрируют те же отношения потоков, что и спектр TDS на рис. 2.6, независимо от положения щели. Два спектра SCORPIO-2, полученные с интервалом в 1 год, также идентичны. Учитывая, что данные SCORPIO-2/БТА были получены на 5 — 6 лет раньше, можно сделать вывод, что объект #А является переменным на этой временной шкале, но для подтверждения данного вывода необходимы последующие спектральные наблюдения туманности.

Спектральная переменность характерна для проэволюционировавших массивных звезд. Переменность линий водорода зарегистрирована, например, для многих звезд BSG, окруженных туманностями (см. [133—135]). Хотя звезды типа WR обычно не проявляют переменности [136], некоторые LBV с минимальной яркостью во время горячей фазы демонстрируют спектры, аналогичные спектрам WR (например, AG Car [137], звезда Романо [138]). Поэтому мы не можем исключить принадлежность изучаемого объекта к классу LBV. Если звезда, ионизирующая туманность, относится к классу LBV, то это одна из самых ярких звезд LBV в соседних галактиках наряду с NGC 2363-V1 [139; 140]. Для отнесения звезды к классу LBV, однако, необходимы многолетние фотометрические наблюдения объекта с последующим анализом изменения положения на диаграмме цвет-звездная величина.

Следует также отметить, что спектр области ионизации в зоне рентгеновского излучения на периферии туманности WR NGC 6888 вокруг звезды WR 136 демонстрирует такое же peculiarное соотношение линий $[\text{S II}]/[\text{N II}]$, как в нашем объекте #А (см. рис. 10 в [132]). Однако линия $\text{He II}\lambda 4686$ в наблюдаемом спектре отсутствует, а линия $[\text{O III}]$ значительно слабее, чем в нашем случае.

Таким образом, спектр обнаруженного нами объекта #А обладает несколькими необычными особенностями, делающими его уникальным, и на

данный момент в научной литературе не описано ни одного аналога этого объекта.

2.7 Основные выводы главы

Для пекулярной туманности в галактике NGC 4068 (объект #A) показано, что её центральным источником ионизации является одиночный, неразрешённый на изображениях *HST* объект с эффективной температурой $T_{\text{eff}} \sim 40$ кК и болометрической светимостью $L_* \sim (1.5-1.7) \times 10^6 L_{\odot}$. Источник окружён туманностью, неразрешённой на полученных изображениях и спектрах; верхний предел её радиуса оценивается как $R < 15$ пк. Туманность расширяется со скоростью $V_{\text{exp}} \sim 38$ км/с, а верхняя граница её кинематического возраста составляет $t \sim 0.5$ млн лет.

Содержание кислорода в объекте #A ($12 + \log(\text{O}/\text{H}) \sim 7.4-7.5$) согласуется с металличностью соседних областей галактики NGC 4068, и относительные содержания Ar/O и Ne/O также соответствуют галактической металличности. Однако в туманности обнаружен значительный переизбыток азота ($\log(\text{N}/\text{O}) = -0.04 \pm 0.27$).

Наблюдаемые свойства объекта #A позволяют предположить, что это одиночная массивная звезда с низким содержанием металлов на стадии генерации мощного звёздного ветра. Опираясь на модели спектра туманности, построенные с помощью фотоионизационного кода Cloudy, мы показываем, что источником ионизации может являться одиночная массивная звезда WR с начальной массой $\sim 80 M_{\odot}$.

Глава 3. Взаимодействие массивных звезд с межзвездной средой в карликовой галактике IC 1613¹

Данная глава посвящена исследованию физических характеристик слабых источников излучения ионизованного газа, ассоциированных с крупномасштабной H I-сверхоболочкой в неправильной галактике IC 1613. Объектом анализа выступают диффузные H II-области и оболочечные структуры, локализованные на периферии основного комплекса звездообразования. Одной из целей работы является определение природы выявленных слабых эмиссионных структур и оценка вклада различных механизмов возбуждения газа, включая фотоионизацию звёздами ранних спектральных типов и ударное возбуждение, ассоциированное с остатками сверхновых или другими высокоэнергетичными источниками.

Еще одной целью работы является уточнение классификации ранее обнаруженных кандидатов в звёзды Вольфа–Райе, предложенных на основе узкополосной фотометрии в работе [141]. Кроме того, мы обнаружили два объекта с эмиссионными линиями типа P Cug в спектре H α и обсуждаем их возможную классификацию.

3.1 Слабые оболочки ионизованного газа, обнаруженные в линии H α

На картах галактики IC 1613 в эмиссионной линии H α , полученных на приборах NBI/КГО (см. 1) и PTT-150, выделяются слабые эмиссионные туманности. Они находятся в восточной части исследуемой области галактики, и на рис. 3.2 располагаются справа от главной области звездообразования IC 1613 и обозначены как B1–B7. Некоторые из описываемых нами оболочек видны также на архивных изображениях в фильтре H α , полученных ранее другими исследователями (а именно, оболочки B3, B5 и B7 видны на карте из Little Things Database ([142])). Благодаря лучшей глубине изображения и более ши-

¹Данная глава основана на работе (a2) из списка публикаций по теме диссертации

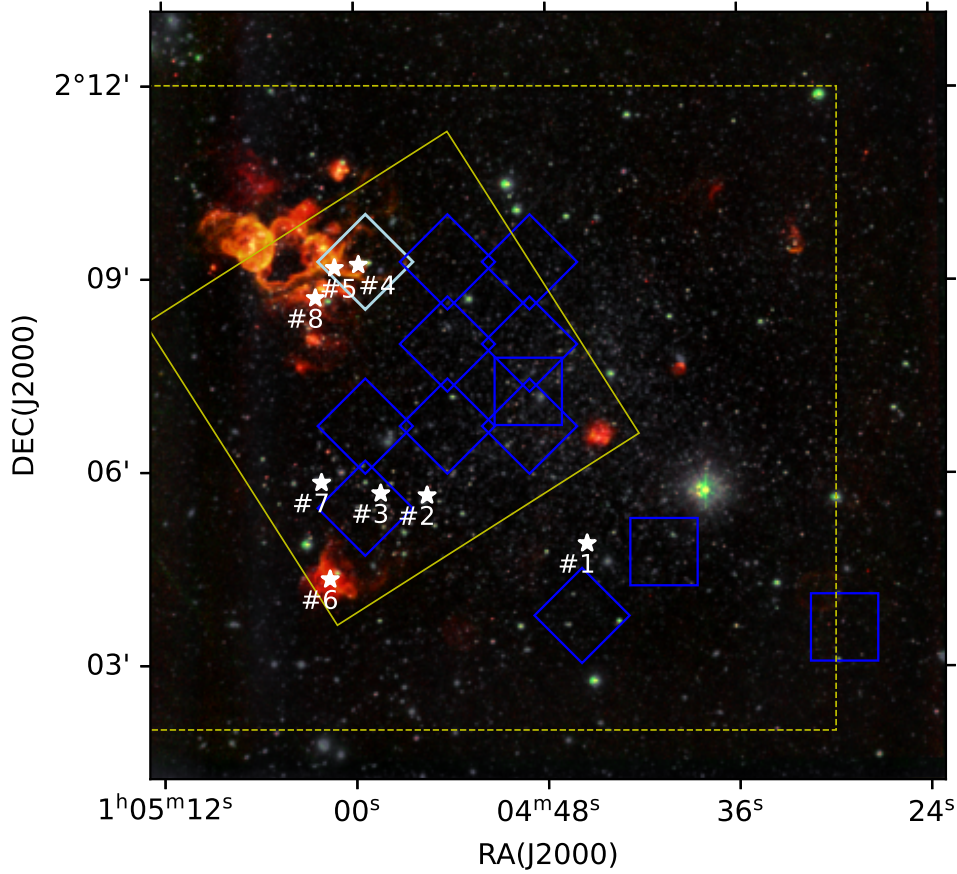


Рисунок 3.1 — Составное изображение $[S II] + H\alpha +$ континуума, полученное на телескопе РТТ-150. Желтым пунктирным квадратом выделено поле фотометрических наблюдений в эмиссионной линии $H\alpha$ на 2,5-м телескопе КГО. Желтым сплошным квадратом показано поле изображения, полученного на фотометре с перестраиваемым фильтром MaNGaL в линии $He II$. Положения полей MUSE/VLT отмечены темно-синими квадратами. Символы белых звезд указывают на позиции кандидатов в звезды WR, описанных в работе [141].

рокому полю зрения полученных нами данных, нам удалось обнаружить и другие оболочки (B1, B2, B4 и B6). В нашей работе впервые получены спектры всех описанных областей. Мы провели длиннощелевую спектроскопию с помощью приборов SCORPIO-1/SCORPIO-2, используя положения щели $PA=15^\circ$, $PA=-5^\circ$, $PA=-2^\circ$, $PA=-15^\circ$. Щели пересекли три слабые оболочки $H\alpha$ (B1, B2, B3, отмеченные на рис. 3.2) и цепь из слабых оболочек B4–B7 (последняя показана отдельно на правой панели рис. 3.2).

Для анализа природы слабых оболочек были также использованы радионаблюдения на длине волны 21 см, полученные на телескопе VLA. Подробное

описание данных приведено в работе [94]. Согласно рис. 3.1, четыре из семи изученных оболочек (B1, B2, B3, B7) расположены в плотных областях H I, а оболочки B4–B6 лежат на окраине областей нейтрального водорода.

Для дальнейшего анализа из полученных спектральных данных были извлечены спектры 10 областей, отмеченных как S_1 – S_{10} на рис. 3.2. Спектры S_1 и S_2 соответствуют краям оболочки B1. Размер этой оболочки составляет 71 пк. По данным каталога [100], в этом регионе находится ОВ-ассоциация, содержащая 18 звезд, 17 из которых относятся к типам О и В.

Области суммирования спектров S_3 и S_4 расположены на краях оболочки B2. Внутри данной оболочки ОВ-ассоциации отсутствуют, однако данная область находится на одном луче зрения с точечным источником рентгеновского излучения, согласно данным XMM-Newton и Swift/XRT. Ниже обсуждается возможная природа источника ионизации этой области H α . Размер оболочки составляет 125 пк.

Спектр S_5 соответствует центральной области туманности B3 с однородной структурой и размером 106 пк. Туманность содержит небольшую ОВ-ассоциацию (4 ОВ-звезды по данным каталога [100]).

Щель с позиционным углом PA=−5° пересекает цепь оболочек B4, B5, B6, одиночную оболочку B7 и газовые структуры между ними. Оболочки B4–B7 имеют размеры 113, 247, 158 и 66 пк соответственно. Оболочки B4, B6 и B7, возможно, связаны с находящимися на одном поле зрения с ними ОВ-ассоциациями. Центральная часть оболочки B5 не перекрывается ни с одной ОВ-ассоциацией, но, используя карту ОВ-ассоциаций, можно заметить, что молодое звездное население распределено на границе ионизованного газа. Наблюдаемое распределение ОВ-ассоциаций может указывать на волну вторичного звездообразования в плотных стенках оболочек. Однако, если рассматривать отдельные О-звезды из полного каталога [100], то такого явного пространственного соответствия между массивными звездами и ионизованным газом нет.

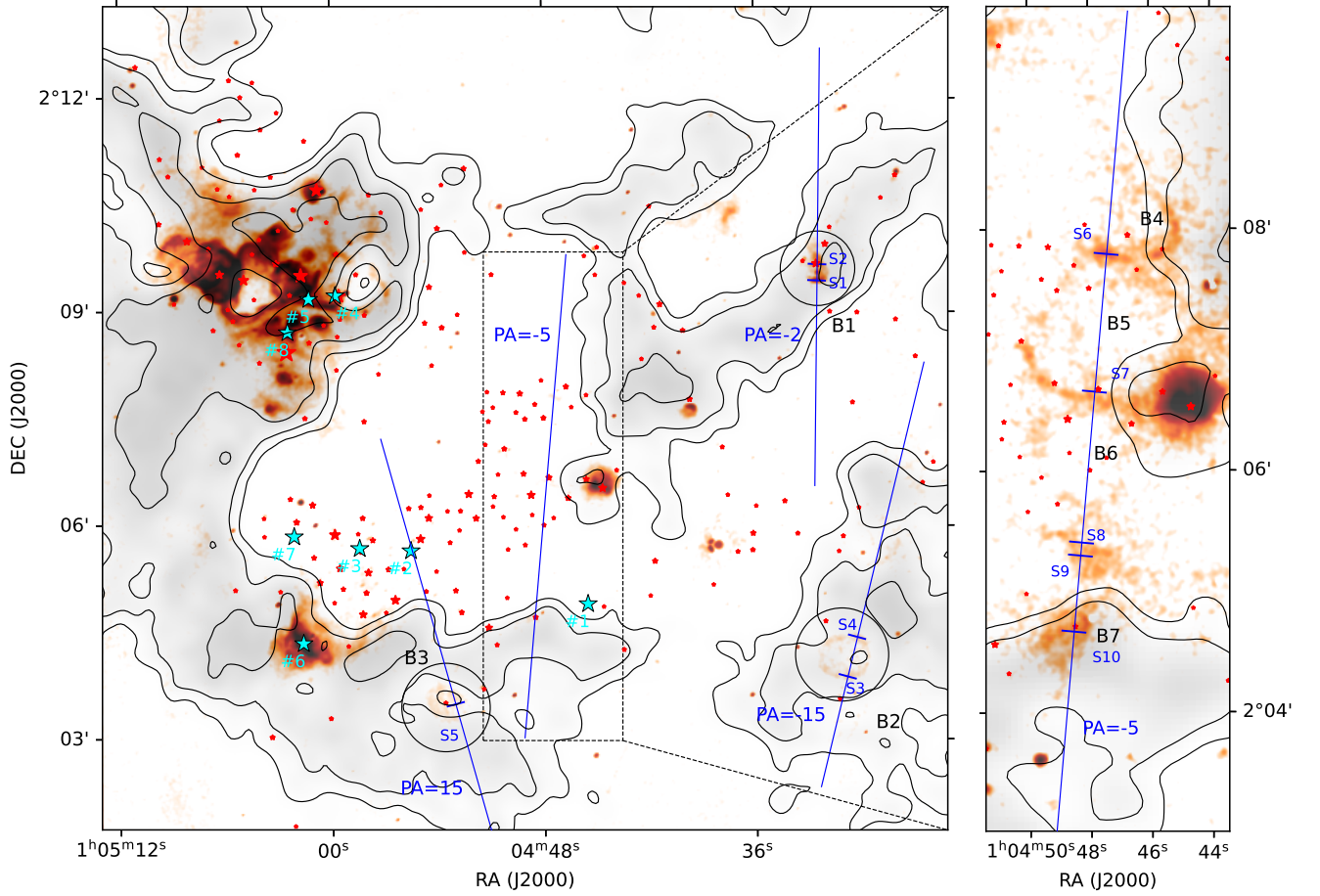


Рисунок 3.2 — Карта галактики IC 1613 в эмиссионной линии $H\alpha$ (оранжевый) и распределение колонковой плотности $H\text{ I}$ (серый) из работы [94]. Контуры соответствуют распределению $H\text{ I}$ с уровнями $3, 10, 25, 50 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$. На левой панели представлена карта IC 1613 в эмиссионной линии $H\alpha$, полученная на 1,5-м телескопе РТТ-150. На правой панели показана часть карты, полученной с помощью 2,5-м телескопа КГО, на которой видны особенно слабые структуры ионизованного газа. Синие линии на карте обозначают положения щелей при длиннощелевой спектроскопии. Положения спектров интересующих объектов относительно щелей обозначены как S1–S10, соответствующие спектры показаны на рис. 3.4 и 3.5. Красными звездами отмечены позиции ОВ-ассоциаций из каталога [100]. Кандидаты в звезды Вольфа-Райе (сWR) из работы [141] отмечены голубыми звездами #1–8.

3.1.1 Состояние ионизованного газа

В целях изучения состояния ионизации газа в обнаруженных слабых оболочках на следующем этапе были построены диагностические ВРТ-диаграммы [60], основанные на отношениях линий $[\text{O III}]/\text{H}\beta$, $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ и $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$. Границы, разделяющие области фотоионизации и ударной ионизации взяты из классических работ [61] и [62]. Подробно применение метода ВРТ-диаграмм для оценки состояния ионизованного газа описано нами в разделе 1.2.2. В случае низкометаллической галактики IC 1613 необходимо учитывать изменение положения разделительной границы относительно классического (в нашем случае, из работ [61] и [62]). По данным [143], металличность для IC 1613 равна $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7,62$. Для оценки влияния низкой металличности на разделяющие линии на диаграммах ВРТ, представленных на рис. 3.3, на диаграмму дополнительно нанесены модели фотоионизации из [63] с фиксированной металличностью $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8,0$ и соотношения $\text{N}/\text{O} = -1,5$, типичного для галактик с такой металличностью (см. рис. 6 в [103]). На рис. 3.3 также показаны соотношения линий для ярких областей $\text{H}\alpha$, полученные из данных MUSE/VLT. Исходя из предположения, что это нормальные области H II , мы сравниваем с их положением на диаграмме положения изучаемых в работе слабых оболочек. Соотношения линий для ярких областей $\text{H}\alpha$ по данным MUSE/VLT хорошо согласуются с моделями из [63].

Длиннощелевые спектры объектов S1–S10 приведены на рис. 3.4 и 3.5. Большинство полученных длиннощелевых спектров демонстрируют яркие линии $[\text{S II}]$, при этом линии $[\text{N II}]$ часто не видны. Кроме того, не все спектры демонстрируют достаточный для оценки поток в линии $[\text{O III}]\lambda 5007$. Для тех спектров, где поток в одной из диагностических линий не обнаружен, оценен его верхний предел (на графике верхняя/нижняя оценка показана стрелкой).

Ни один из изучаемых объектов на диаграммах ВРТ не выходит значительно за пределы разделяющих линий. При этом спектр S2 находится дальше всего от моделей [63]. Из построенных диаграмм можно заключить, что ударные волны могли способствовать ионизации одной из оболочек (а именно, оболочке В1 с соответствующим ей спектром S2). Остальные области не демонстрируют признаков ударной ионизации.

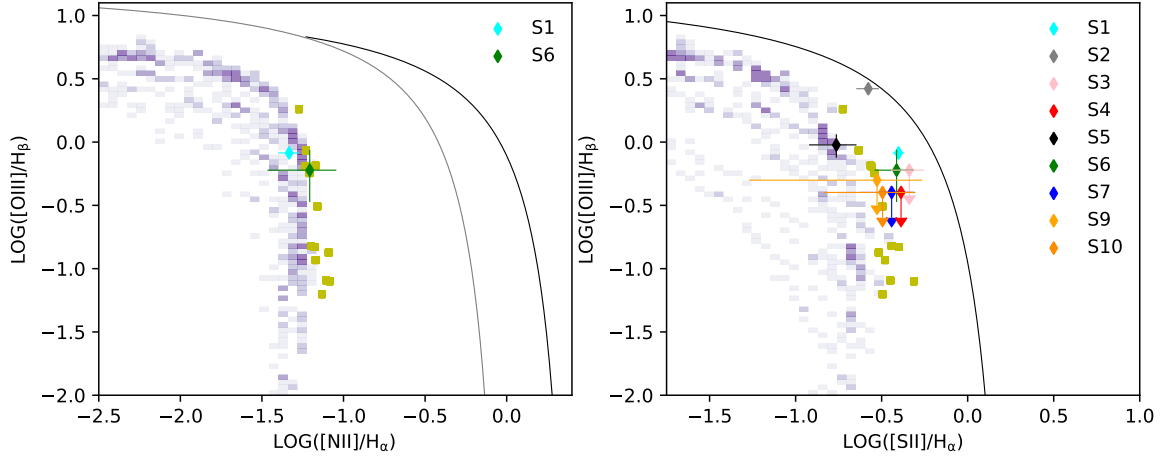


Рисунок 3.3 — Диагностические BPT-диаграммы, показывающие отношения линий $[\text{O III}]/\text{H}\beta$ в зависимости от $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ (левая панель) и $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ (правая панель) для слабых ионизованных оболочек, перечисленных в таблице

7. Соответствующие спектры показаны на рис. 3.4 и 3.5. Диаграммы включают черные и серые кривые из [61] и [62], которые служат границей между областями фотоионизации (расположенными слева от линий) и областями с высоким вкладом других механизмов возбуждения. Модели с фиксированными $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8,0$ и $\text{N}/\text{O} = -1,5$ из [63] наложены на графики в виде гистограммы. Желтые точки соответствуют данным MUSE/VLT для яркой области $\text{H}\alpha$, в которой преобладает фотоионизация (соответствующая область отмечена голубым квадратом на рис. 3.1).

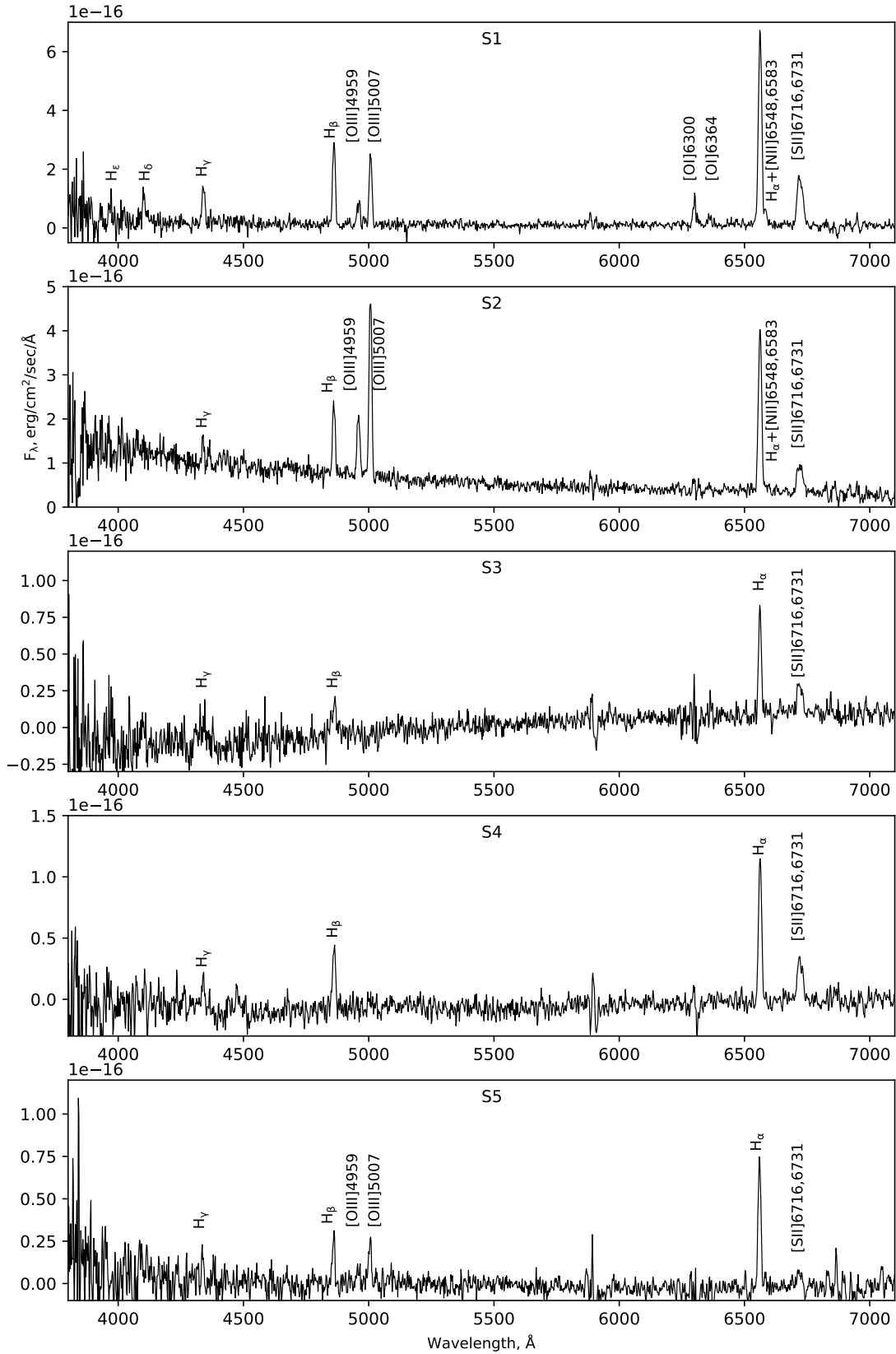


Рисунок 3.4 — Спектры S1–S5 слабых областей Н II В1–В3, полученные на 6-м телескопе БТА. Потoki, соответствующие эмиссионным линиям, перечислены в таблице 7. Нумерация спектров соответствует нумерации на рис. 3.2

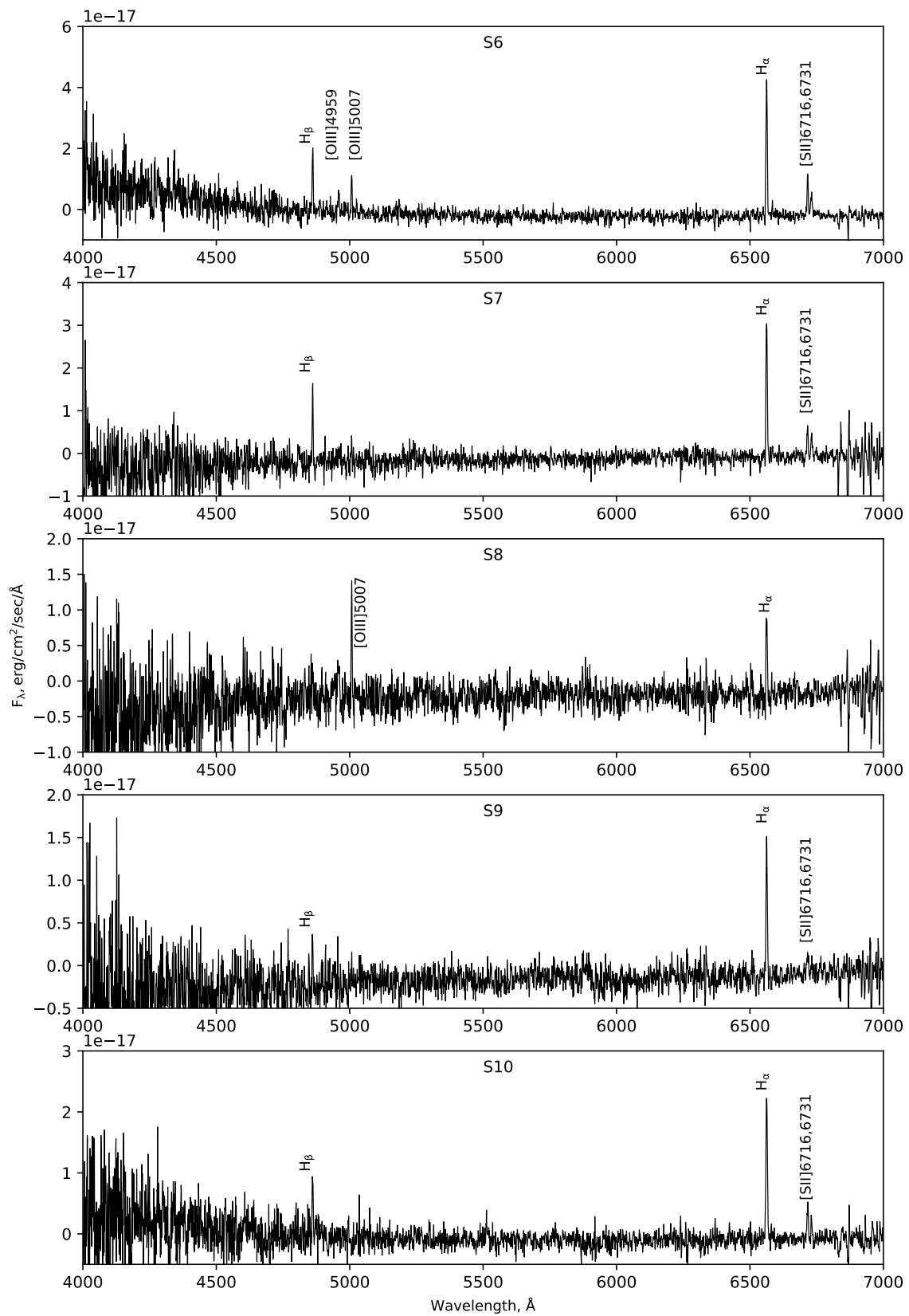


Рисунок 3.5 — Спектры S6–S10 слабых областей H II B4–B7 полученные на 6-м телескопе БТА.

Таблица 7 — Потоки эмиссионных линий относительно линии $H\beta$ для исследуемых областей в IC 1613. Для линий, не превышающих предел шума, оценен верхний предел потока (см. подробное описание метода в 3.1.1).

#	$H\alpha/H\beta$	[OII] $\lambda 5007$	[OI] $\lambda 6300$	[NII] $\lambda 6583$	[SII] $\lambda 6716$	[SII] $\lambda 6731$
S_1	2.8 ± 0.1	0.82 ± 0.05	0.30 ± 0.03	0.130 ± 0.018	0.66 ± 0.04	0.45 ± 0.04
S_2	2.91 ± 0.17	2.64 ± 0.15			0.40 ± 0.06	0.37 ± 0.05
S_3	3.1 ± 0.4	<0.6			0.85 ± 0.17	0.57 ± 0.13
S_4	3.0 ± 0.3	<0.4			0.73 ± 0.12	0.49 ± 0.09
S_5	2.9 ± 0.4	0.95 ± 0.19			0.30 ± 0.08	0.20 ± 0.07
S_6	2.9 ± 0.6	0.60 ± 0.26		0.18 ± 0.08	0.73 ± 0.18	0.39 ± 0.10
S_7	2.6 ± 0.7	<0.4			0.53 ± 0.18	0.41 ± 0.14
S_8	-	>8.8				
S_9	3.7 ± 2.6	<0.5			0.7 ± 0.6	0.4 ± 0.3
S_{10}	3.5 ± 1.5	<0.4			0.7 ± 0.4	0.42 ± 0.22

Линия $H\beta$ в спектре S8 находится за пределом измерений из-за низкого отношения S/N , поэтому мы оценили поток в ней, предположив, что соотношение $H\alpha/H\beta = 2,86$, что является типичным значением для газа при температуре 10 000 K [80]. При этом предположении значение отношения потоков $[O II]/H\beta$ составляет не менее 8,8. Столь высокое отношение потоков можно объяснить планетарной туманностью, пересекаемой щелью. Для планетарных туманностей характерно высокое соотношение $[O II]/H\beta$ (см. [80]).

3.1.2 Ионизационный баланс между излучением $H\alpha$ -оболочек и массивных звезд

В данном разделе приведены оценки баланса между ионизирующими квантами, испускаемыми O-звездами, и количеством ионизованного газа в найденных оболочках H II.

На карте $H\alpha$, полученной с помощью 1,5-м телескопа РТТ-150, хорошо видны оболочки В1, В2 и В3. Согласно этой карте, В2 и В3 демонстрируют правильную геометрическую форму. Данная карта имеет меньшую глубину, чем карта, полученная на 2,5-метровом телескопе КГО, однако последняя имеет ограниченное поле зрения, из-за чего оболочки В2 и В3 видны не полностью. Поток в линии $H\alpha$ от слабых оболочек оценивался с использованием более глубокой карты $H\alpha$, полученной на 2,5-м телескопе КГО. Так как оболочки В2 и В3 частично находятся вне ее поля, их потоки оценивались методом экстра-

поляции распределения потоков видимых частей (правильная геометрическая форма оболочек видна на карте, полученной на РТТ-150). Затем поток, измеренный по карте с 2,5-метрового телескопа, умножался на соответствующий геометрический коэффициент. Ошибки потока оценивались с использованием стандартного отклонения потока фона и не включали систематические ошибки. Фон вычитался для каждого региона индивидуально с использованием близких участков карты.

Далее производилось сравнение интегральных потоков оболочек в эмиссионной линии $H\alpha$ с количеством ионизирующих водород фотонов Лайман-континуума (как описано в разделе 1.2.4).

Область В1, содержащая внутри ОВ-ассоциацию из 17 ОВ-звезд, демонстрирует избыток ионизирующих фотонов, испускаемых массивными звездами, по сравнению с фотонами, необходимыми для ионизации водорода в этой оболочке ($Q_{H\alpha} = (2,91 \pm 0,01) \times 10^{-48} s^{-1}$ против $Q_{M_V} = 54 \times 10^{-48} s^{-1}$), что указывает на потенциальную утечку ионизирующих фотонов из МЗС галактики. Внутри оболочки В3 также имеется ОВ-ассоциация, но она гораздо меньше (4 ОВ-звезды). В этой ассоциации присутствует только одна звезда с $M_V < -3,8$, поэтому мы оценили количество ионизирующих фотонов от нее. По нашим расчетам, число ионизирующих фотонов от этой звезды составляет $Q_{M_V} = 0,9 \times 10^{-48} s^{-1}$ против $Q_{H\alpha} = (2,27 \pm 0,01) \times 10^{-48} s^{-1}$, что означает, что излучения звезды недостаточно для ионизации туманности.

Область В2 не содержит ОВ-ассоциаций и одиночных О-звезд. Самая яркая звезда в этой оболочке имеет абсолютную звездную величину $M_V = -3,2$, тогда как другие звезды значительно менее яркие. Учитывая, что для ионизации этой оболочки требуется то же количество фотонов, что и для остальных рассматриваемых оболочек ($Q_{H\alpha} = (3,06 \pm 0,01) \times 10^{-48} s^{-1}$), его ионизация не может объясняться излучением массивных звезд.

Мы не оценивали энергетический баланс для оболочек В4–В6, так как на основании построенной карты $H\alpha$ неочевидна связь между этими оболочками $H II$ и ОВ-ассоциациями, способными их ионизовать.

Внутри оболочки В7 расположена одна ОВ-ассоциация, содержащая 6 ОВ-звезд. Для этого региона $Q_{H\alpha} = (1,37 \pm 0,01) \times 10^{-48} s^{-1}$. В этом регионе есть одна очень яркая звезда с $M_V = -6,4$, которая может ионизовать всю оболочку, тогда как другие звезды демонстрируют существенно меньшую яркость ($M_V > -3$).

3.1.3 Кандидаты в остатки сверхновых

Несмотря на то, что положение оболочки В2 на ВРТ-диаграмме не выделяется, в этой области не наблюдаются ОВ-ассоциации или О-звезды (по данным анализа каталога [100]). Тем не менее, интегральный поток $H\alpha$ от В2 оказывается сравнимым с потоком от двух других областей В1 и В3. Отсутствие различных объектов внутри оболочки повышает вероятность того, что это может быть остаток сверхновой.

Чтобы проверить данную гипотезу, мы исследовали область В2 с помощью архивных данных на разных длинах волн. Данные радионаблюдений из работы [144], охватившие всю галактику с разрешением $5''$ и предельной чувствительностью по потоку $4,3 \times 10^{-15}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{s}^{-1}$, соответствующей светимости $7,8 \times 10^{34}$ эрг см^{-2} (с учетом поглощения), не выявили каких-либо значимых радиоисточников в области В2. Данные в рентгеновском диапазоне также были приняты во внимание: оболочка В2 не была покрыта архивными изображениями *Chandra*, но была охвачена наблюдениями *XMM-Newton* и *Swift/XRT*. Обе обсерватории обнаружили один точечный источник внутри В2, обозначенный как 4XMM J010431.4+020409 [145] / 2SXPS J010431.3+020410 [146], расположенный на расстоянии $\approx 10''$ от центра оболочки. Мы извлекли спектр источника из наблюдения *XMM-Newton* 0781200401 с помощью XMM SASv20, используя круговые апертуры $15''$ и $40''$ для источника и фона соответственно. Фоновая область располагалась на том же чипе EPIC-pn, максимально близко к положению источника, что позволило учесть возможный вклад диффузного излучения галактики. Предполагая, что источник находится в галактике IC 1613, его собственную светимость можно оценить как $L_X \approx 6 \times 10^{36}$ эрг с^{-1} . Полученное значение типично для рентгеновских двойных систем или ярких пульсаров/пульсарных ветровых туманностей.

На данный момент в литературе описаны несколько рентгеновских двойных систем, расположенных в родительских ОСН [147], и все они содержат горячие и массивные звезды. Однако, как уже говорилось, внутри оболочки В2 нет оптически ярких звезд, поэтому сценарий рентгеновской двойной системы маловероятен. На эмиссионных картах в линии $H\alpha$ в области рентгеновского источника нет эмиссионных объектов. Отсутствие обнаружения источника в

радиодиапазоне также указывает на малую вероятность того, что источником является молодой пульсар. Мы предполагаем, что 4ХММ J010431.4+020409 может быть фоновым активным галактическим ядром, хотя для подтверждения этой гипотезы необходимы дополнительные радио/БИК/рентгеновские наблюдения. Тем не менее, положение источника практически в центре туманности В2 указывает на высокую вероятность связи между этими объектами. В свете проведенного нами анализа происхождение и механизм ионизации оболочки В2 остаются спорными.

Необходимо также отметить, что среди спектров слабых областей галактики IC 1613 выделяется яркий источник линии [O III] (спектр S_8 , для которого $[O III]/H\beta > 8,8$). Такое соотношение линий можно объяснить, предположив попадание в поле зрения щели планетарной туманности.

3.2 Кандидаты в звезды WR в галактике IC 1613

3.2.1 Кандидаты в звезды WR на карте He II

В работе [141] описан поиск звезд WR в трех областях IC 1613 с использованием узкополосных фильтров ($FWHM=55\text{\AA}$), ориентированных на особенности спектрального излучения, характерные для звезд WR типа WC (C III $\lambda 4650$ + Звезды N III $\lambda 4634,42$) и WN (He II $\lambda 4686$) и красный континуум ($\approx \lambda 4750$). В этих линиях были обнаружены 8 кандидатов в звезды WR (далее - cWR): шесть предполагаемых звезд WN (звезда #8 в более поздних работах была классифицирована как OCH), одна звезда WC (#4) и уже известная звезда #6, которая была классифицирована как очень редкая звезда типа WO [148; 149]. В последующей работе этих авторов ([150]) cWR #6 был подтвержден, а cWR #4 отклонен на основании спектральных данных. Также было показано, что cWR #8 является остатком сверхновой, что подтвердили последующие исследования [151]. Для других кандидатов в cWR данные были недостаточно глубокими, чтобы сделать надежные выводы о природе объектов.

Приведенные исследования, указывающие на возможный высокий темп образования WR звезд в карликовой галактике, побудили нас использовать IC 1613 в качестве тестового объекта для первых наблюдений MaNGaL в линии He II. Линия He II $\lambda 4686$ видна в спектрах только самых высокоэнергетичных источников, таких как звезды WR (спектральных типов WN, WO), OCH или галактики с активным галактическим ядром. На практике, наблюдения с узкополосным фильтром с центральной длиной волны, близкой к 4686 Å, часто используются для поиска звезд WR (см., например, [152],[153],[154]).

В работе используется глубокое изображение галактики IC 1613 с суммарной экспозицией 6000/5000с в эмиссионной линии/континууме на 2,5-метровом телескопе КГО с хорошим качеством изображений ($\sim < 1,5''$). Более того, фотометрия с перестраиваемым фильтром на приборе MaNGaL, установленном также на 2,5-м телескопе КГО, обеспечила очень точное вычитание подстилающего континуума по сравнению с "классическим" изображением в узкополосных фильтрах (см. [59]). В полученных данных нам удалось достичь среднего значения среднеквадратичной ошибки в изображении с вычтенным континуумом $6,3 \times 10^{-18}$ эрг с⁻¹ см⁻²/пиксель, что соответствует регистрации с $S/N > 3$ звездообразных источников с интегральным потоком в линии He II ярче 5×10^{-17} эрг с⁻¹ см⁻² и протяженные структуры с поверхностной яркостью более 6×10^{-17} эрг с⁻¹ см⁻² угл.с⁻². Изображение галактики в фильтре He II приведено на рис. 3.6.

На рис. 3.6 наглядно видно, что из 7 кандидатов из списка [141] в поле зрения MaNGaL обнаружено только два эмиссионных источника He II. Увеличенные поля вокруг кандидатов WR показаны на рис. 3.7 вместе с изображениями обзора DESI Legacy. Все кандидаты имеют звездные величины от 19,8 до 20,8 в голубой части континуума и обнаружены с высоким значением S/N на изображениях MaNGaL, однако излучение He II оказалось выше уровня обнаружения только у звезды #6 (WO) и звезды # 8 (OCH). Помимо уже известных источников He II (#6 и #8) в данных обнаружен еще один дополнительный источник излучения, отмеченный нами по координатам съемки DESI Legacy как J010457.6+020953. Согласно нашему предположению, объект является далекой галактикой фона (рис. 3.7).

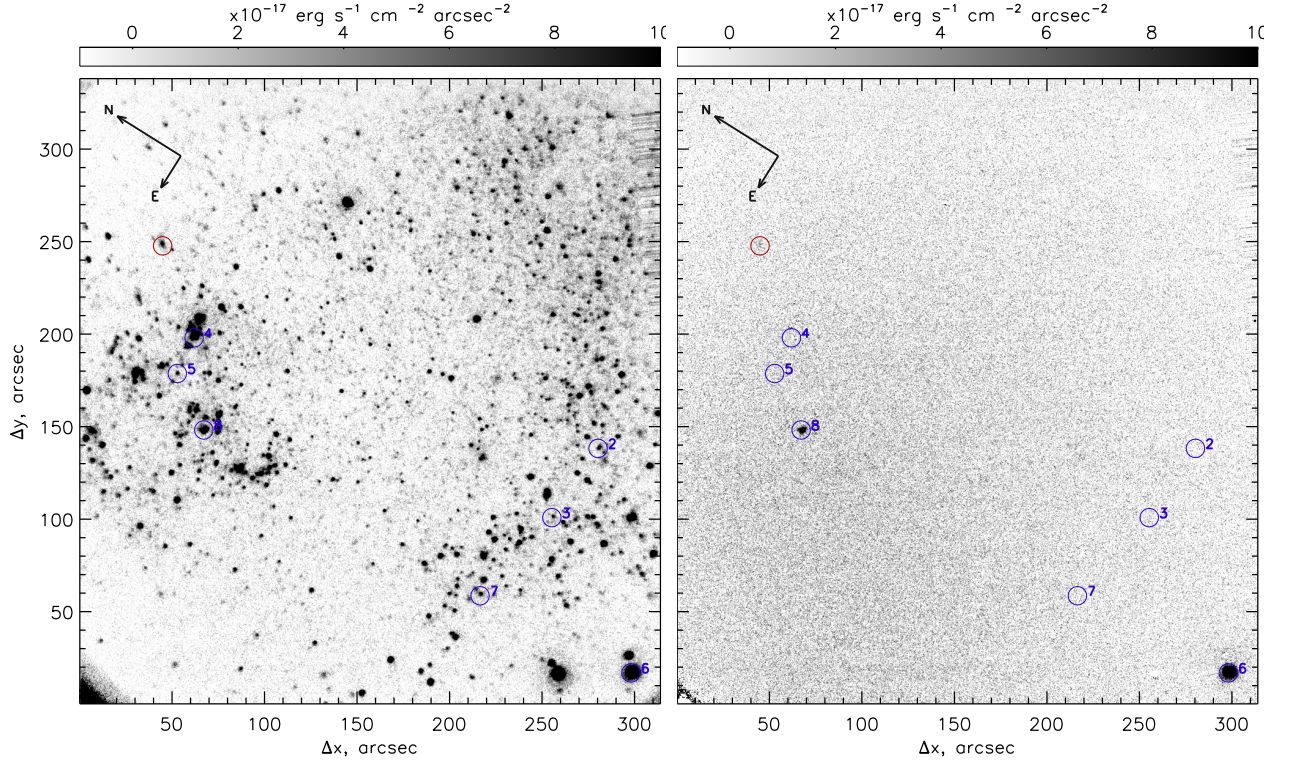


Рисунок 3.6 — Изображения, полученные на фотометре с перестраиваемым фильтром MaNGaL в эмиссионной линии He II до (слева) и после (справа) вычитания континуума. Синие кружки (диаметром 10 угловых секунд) окружают sWR-звезды из работы [141], красным кружком выделена галактика фона J010457.6+020953.

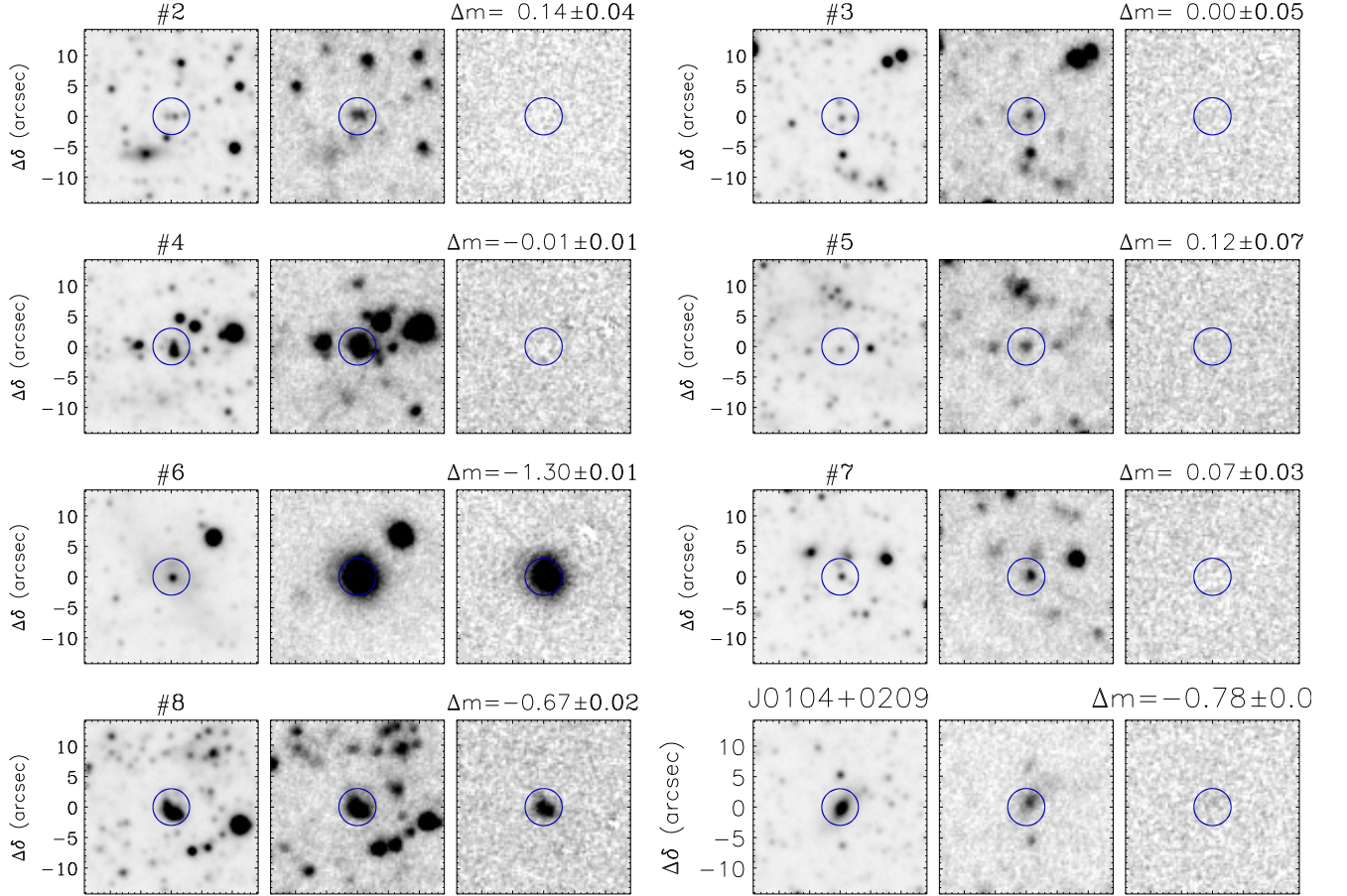


Рисунок 3.7 — Области $15'' \times 15''$ вокруг кандидатов в WR-звезды показаны согласно их номерам в [141], также показана галактика фона J010457.6+020953. Слева направо: изображение обзора DESI Legacy в r -диапазоне [155], изображения MaNGaL в фильтре, центрированном по эмиссионной линии He II, до и после вычитания континуума. Синий круг имеет диаметр 6 угловых секунд. Δm показывает разницу между звездными величинами в фильтрах, центрированных на линии и континууме.

3.2.2 Поиск кандидатов в звезды WR в спектральных данных MUSE/VLT

Мы идентифицировали три из восьми кандидатов в звезды WR (#3, #4, #5), упомянутых в работе [141], в данных 3D-спектроскопии MUSE/VLT и извлекли их спектры. Согласно этим данным, кандидат #4 представляет собой группу звезд схожих типов раннего спектрального класса, а кандидаты #3 и #5 — одиночные звезды раннего спектрального класса.

Сначала была выполнена коррекция спектров за покраснение с помощью пакета PYNEB [72] и параметризацию кривой покраснения из работы [156]. Поскольку линии поглощения в спектрах звезд накладываются на излучение окружающего комплекса H II, для более точной оценки величины поглощения в газе использовались спектры областей, близких к исследуемым звездам.

При оценке эффективных температур изучаемых звезд мы опирались на спектральную линию поглощения $H\beta$, которая является единственной видимой линией, относящейся к звездным спектрам. Излучение звезды и окружающей области H II для всех звездных спектров моделировалось одновременно, для чего использовались модели звезд с разными T_e . Затем из каждого наблюдаемого спектра звезды вычитался компонент излучения $H\beta$, относящийся к эмиссионной туманности. Мы использовали программу SynthV [157] и модели звездной атмосферы ATLAS9 [158] (со значениями $[Fe/H]=0,0$ и $\log g=4,5$) для расчета синтетических спектров звезд. Для оценки эффективных температур звезд их спектры были нормированы на уровень континуума, а синтетические спектры были свернуты с инструментальным профилем, соответствующим разрешению спектрографа MUSE/VLT.

Согласно нашему моделированию, все звезды, составляющие объект #4 из [141], хорошо описываются моделью звезды с $T_{eff} \approx 30kK$. Температуру источника #5 оценить этим методом невозможно из-за существенно большего вклада излучения туманности (по сравнению с вкладом звезды) в линию $H\beta$. На основании имеющегося спектра можно лишь заключить, что звезда принадлежит к раннему спектральному классу, и не демонстрирует деталей, характерных для проэволюционировавших объектов. Графики, относящиеся к нашему анализу, представлены на рис. 3.8.

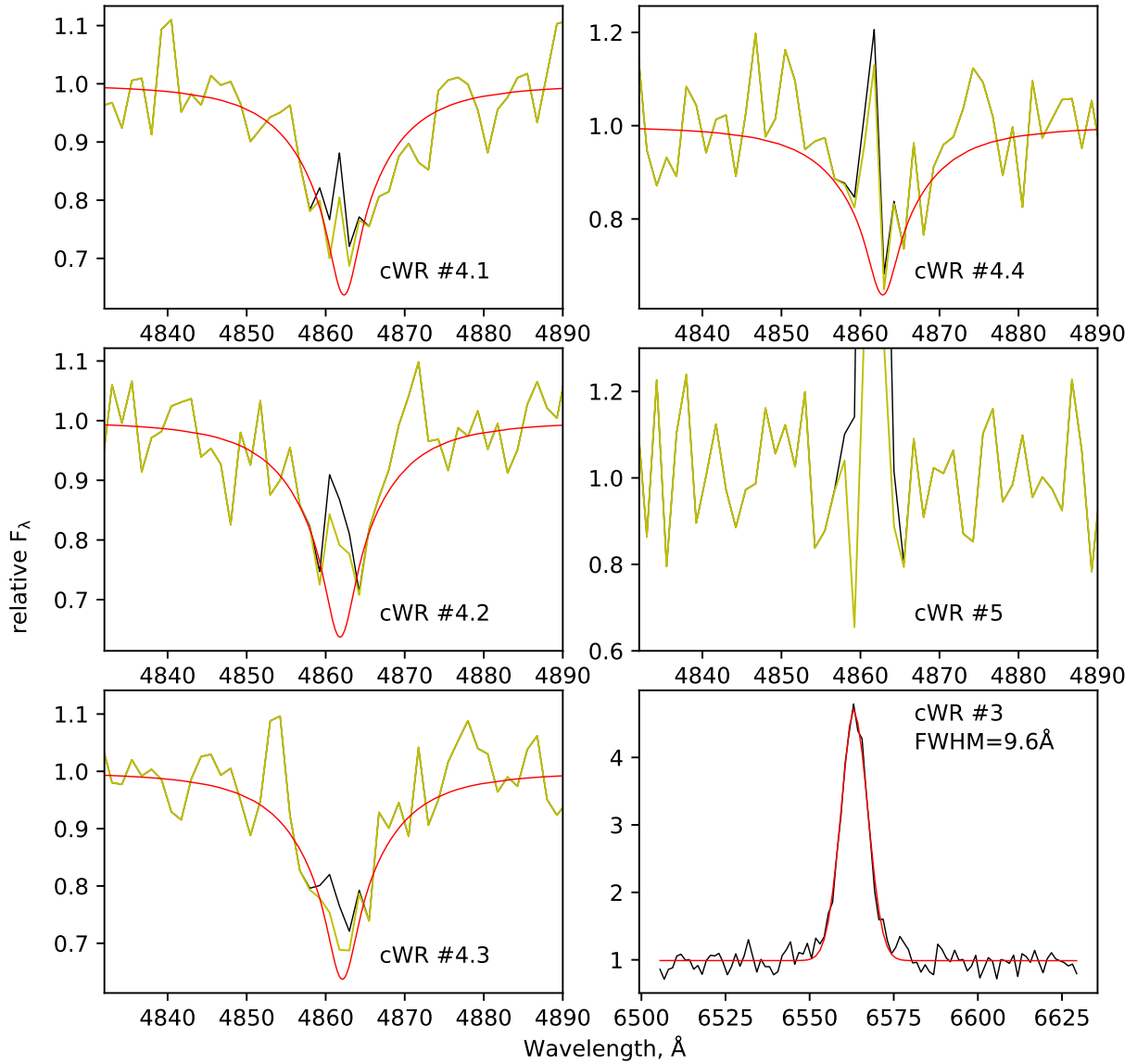


Рисунок 3.8 — Линии $H\beta$ и $H\alpha$ из архивных данных MUSE/VLT для кандидатов в звезды WR #3, #4, #5, как указано в работе [141]. Первые пять спектров: черная линия показывает реальный профиль $H\beta$, нормированный на уровень континуума. Желтая линия показывает профиль линии после вычета излучения окружающего комплекса $H II$. Красной линией показана модель профиля линии звезды с эффективной температурой 30 кК. Объект #4 разделяется на группу из четырёх звёзд раннего спектрального класса с эффективными температурами ~ 30 кК. Объект #5 — звезда раннего спектрального класса, но достоверно оценить его температуру не представляется возможным из-за сильной эмиссии области $H II$ в районе расположения звезды. Нижний правый спектр: черная линия показывает профиль $H\alpha$ от звезды. Моделирование (красная линия) показывает, что эмиссионных небулярных компонент нет, а есть только широкая эмиссия звезды. Описание моделирования и обсуждение см. в разделе 3.2.

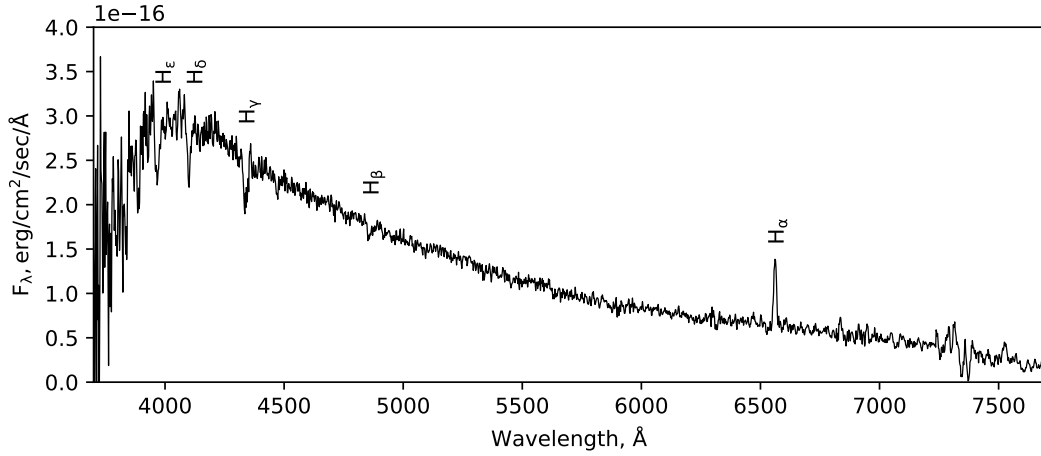


Рисунок 3.9 — Длиннощелевой спектр звезды cWR #2, полученный на телескопе БТА.

Третья звезда cWR (объект #3 в [141]) демонстрирует широкую эмиссионную компоненту в линии $H\alpha$ ($\text{FWHM}=9,6\text{\AA}$ по сравнению с $\text{FWHM}\approx 3\text{\AA}$ для линий туманности по данным MUSE/VLT на той же длине волны). В спектре нет никаких дополнительных деталей, которые бы ясно указывали на природу звезды #3, но такая широкая линия $H\alpha$ указывает на то, что звезда теряет большое количество своего вещества (например, из-за звездного ветра).

Спектр другого кандидата в звезду WR, cWR #2, был получен в проведенных нами наблюдениях с длинной щелью. Звезда попадает на щель $\text{PA}=15^\circ$ (см. рис. 3.2), ее полный спектр показан на рис. 3.9. В спектре присутствуют линии поглощения в бальмеровской серии и линия $\text{He I}\lambda 4471$, характерная для звезды раннего типа, но также присутствует эмиссионная компонента в линии $H\alpha$. Полуширина линии не превышает спектрального разрешения изображения в этой области. Оценка температуры по линиям поглощения дает оценку $T_e = 24\text{kK}$. Мы относим звезду к типу B1e.

3.3 Звезды с эмиссионной компонентой $H\alpha$ в данных MUSE/VLT

Анализ данных MUSE/VLT выявил большое количество точечных источников излучения в линии $H\alpha$. Для отбора звезд среди этих источников мы использовали круглые апертуры, охватывающие всю область излучения $H\alpha$. Мы вычли фон из спектров, соответствующих выбранным апертурам, и далее ап-

Таблица 8 — Координаты 32 звезд из архивных данных MUSE/VLT, демонстрирующих эмиссию в линии $H\alpha$.

RA DEC, hms dms	
01h04m58.1s +02d08m59.6s	01h04m59.3s +02d09m14.8s
01h04m59.4s +02d09m14.4s	01h04m59.5s +02d08m42.9s
01h05m00.1s +02d09m34.2s	01h05m00.1s +02d09m21.2s
01h04m58.7s +02d09m31.0s	01h04m59.0s +02d09m57.1s
01h04m59.8s +02d09m47.5s	01h04m54.7s +02d09m43.8s
01h04m53.3s +02d08m29.0s	01h04m49.1s +02d07m49.1s
01h04m48.3s +02d07m40.9s	01h04m46.7s +02d08m00.6s
01h04m55.0s +02d06m18.1s	01h04m54.3s +02d06m24.2s
01h04m50.6s +02d07m02.3s	01h04m57.7s +02d05m23.7s
01h05m00.8s +02d05m08.1s	01h05m00.6s +02d05m14.5s
01h04m59.3s +02d05m26.6s	01h04m59.4s +02d05m43.1s
01h04m59.9s +02d05m47.7s	01h04m59.8s +02d05m56.0s
01h04m39.6s +02d05m15.7s	01h04m41.7s +02d05m17.2s
01h04m41.5s +02d04m18.7s	01h04m39.0s +02d04m46.5s
01h04m30.5s +02d03m37.4s	01h04m31.4s +02d03m35.3s
01h04m31.3s +02d03m23.0s	01h04m47.4s +02d07m32.2s

проксимировали линию $H\alpha$ функцией Гаусса. Далее источники отбирались по критерию $S/N_{H\alpha} > 15$, а также учитывалось, что выбранные спектры должны иметь континуум, но не демонстрировать линии, характерные для областей H II (таких как эмиссионные линии [S II], [N II], [O III]). Источники, являющиеся эмиссионными звездами согласно описанным критериям отбора, нанесены на карту 3.10), список их координат приведен в таблице 8.

В большинстве спектров не было обнаружено каких-либо необычных спектральных особенностей, кроме эмиссии в линии $H\alpha$. Однако среди источников найдены два, имеющие профиль типа P Cug. Их спектры представлены на рис. 3.11.

Один из объектов встречается в литературе: в работе [159] частично описан его единственный оптический спектр. Тип объекта в данной работе был определен как звезда A2 Ia. Фотометрия звезды также опубликована в работах [160], [161] и [100]. Используя величину V из базы данных SIMBAD ([162]) из работы [100], $R_V=3,1$ и $E_{B-V}=0,036$. Таким образом, абсолютная звездная величина данной звезды $M_V=-8,04$.

В спектре этой звезды присутствуют линии Ca II $\lambda 8498,8542,8662$, которые указывают на наличие разреженной туманности вокруг нее и

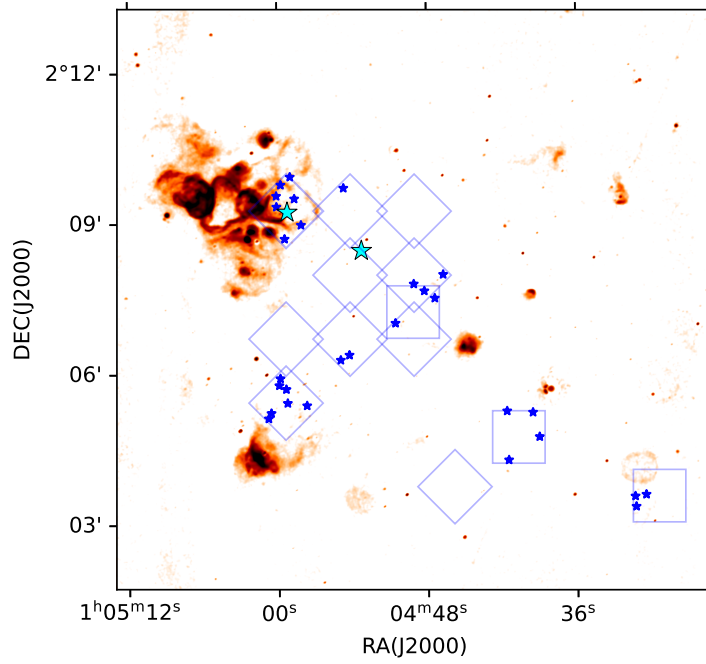


Рисунок 3.10 — Звездообразные источники излучения в эмиссионной линии $H\alpha$ из архивных данных MUSE/VLT; Положения двух звезд с профилем типа РСуг, найденных среди эмиссионных звезд, показаны голубыми звездами. Основная карта представляет собой изображение в эмиссионной линии $H\alpha$, полученное с помощью телескопа РТТ-150.

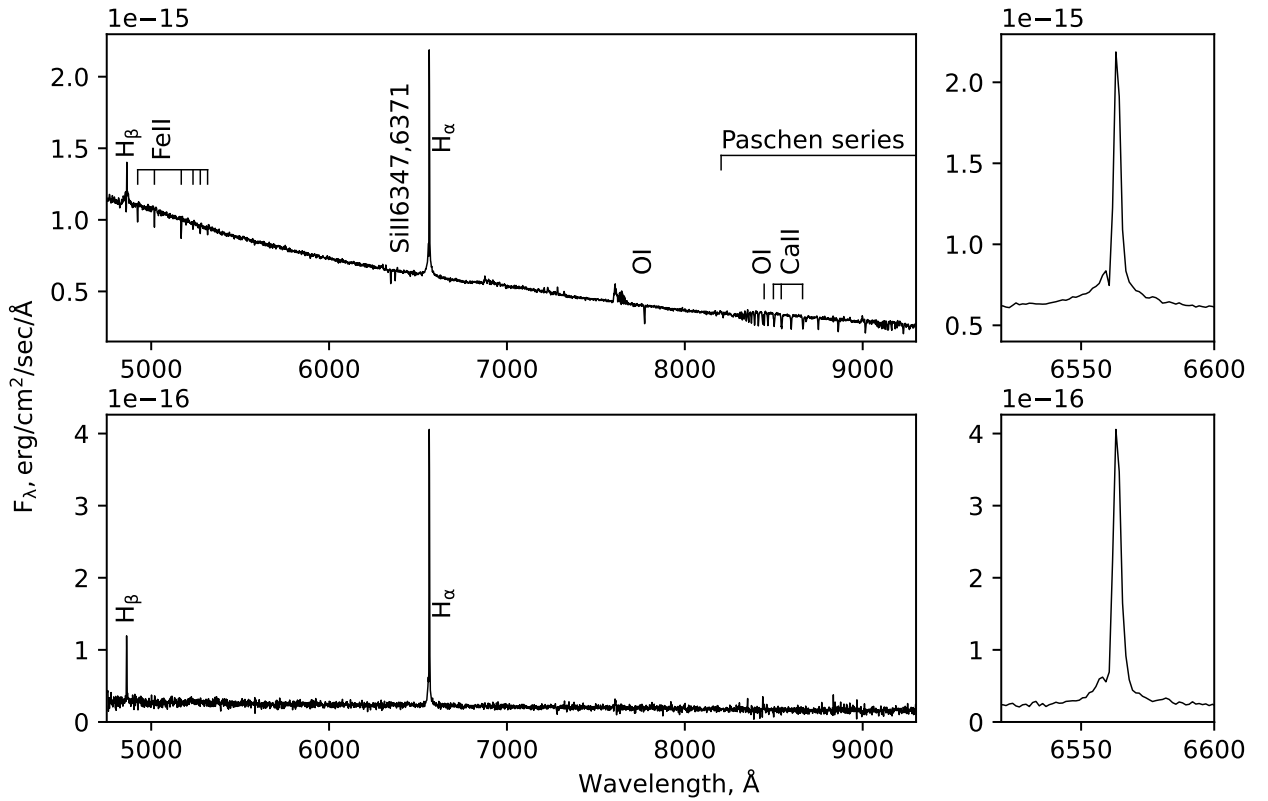


Рисунок 3.11 — Звезды из архивных данных MUSE/VLT, демонстрирующие профиль типа РСуг в линии $H\alpha$.

являются характерными спектральными деталями теплых гипергигантов (см. [163]). Также представлены линии поглощения серии Пашена и линии Fe λ 4924,5018,5169,5235,5276,5317, O λ 7773,8446 и Si λ 6347,6371. Спектр аналогичен спектрам теплых гипергигантов J004507.65+413740.8, J004621.08+421308.2 из галактики M33, исследованных в работах [163], [164]. При сравнении с ранее изученными спектрами звезд LBV в галактике M33 обнаруживается сильное сходство со спектрами V532 [165] и Var C в момент их максимального блеска (см. [166–168]). Гипергиганты обычно не проявляют спектральной переменности, в отличие от звезд LBV, демонстрирующих характерную переменность, поэтому необходимо исследовать звезду на предмет переменности, чтобы окончательно ее классифицировать.

Другая звезда в литературе ранее описана не была. Кроме заметного профиля Р Суг в линиях серии Бальмера, других особенностей в спектре нет. В целом, спектр аналогичен спектру звезды J004051.59+403303.0 из галактики M31 ([169]). По аналогии ее можно классифицировать как кандидата в звезду LBV максимальной яркости или в сверхгигант B[e].

3.4 Основные выводы главы

Большинство слабых оболочек ионизованного газа, обнаруженных в галактике IC 1613 на периферии основной области H II, связаны с ОВ-ассоциациями, а их ионизация вызвана фотоионизацией УФ-излучением от ближайших О-звёзд. Это подтверждается диагностическими диаграммами и оценками энергетического баланса между массивными звездами и МЗС.

Природа оболочки В2 остаётся неоднозначной, поскольку в ней не обнаружено звёзд, способных обеспечить необходимую УФ-светимость для ионизации газа. Кроме того, в центральную область оболочки В2 проецируется источник рентгеновского излучения (который, однако, может являться фоновой галактикой).

На основе фотометрии, полученной для IC 1613 в фильтре He II, отвергнуты 5 опубликованных ранее кандидатов в звёзды WR; для четырёх из них этот результат дополнительно подтверждён спектроскопией. Два кандидата демон-

стрируют сильную эмиссию в линии $H\alpha$, не связанную с окружающей туманностью.

Дополнительно проанализированы спектры 32 звёзд с излучением в линии $H\alpha$, присутствующие в данных 3D-спектроскопии MUSE/VLT; две из них имеют профиль PCyg и потенциально могут принадлежать к типу LBV.

Глава 4. Металличность и мелкомасштабная кинематика в галактике NGC 2366¹

Данная глава посвящена химическому и кинематическому анализу ионизованного газа в близкой низкометалличной галактике NGC 2366, а также поиску массивных звезд на поздних эволюционных стадиях и остатков сверхновых в этой галактике. Галактика представляет значительный интерес как локальный аналог галактик типа Green Pea [52; 53], расположенных на красных смещениях $z \sim 0.2$, в свою очередь возможно имеющих сходство с наиболее далекими галактиками, реионизовавшими раннюю Вселенную.

До настоящей работы наиболее исследованной областью галактики NGC 2366 была область с доминирующим звездообразованием Mrk 71, остальные же области галактики оставались практически неисследованными. В данной работе проводится оценка металличности по всему полю галактики на основе данных длиннощелевой спектроскопии, полученной на телескопе БТА (см. 1.1.1). Мы оценили содержание кислорода и азота с помощью T_e метода для 15 галактических областей H II, а также содержание кислорода с помощью S-калибровки для 23 областей (описание методов приводится в главе 1). Проведенный анализ позволил выявить неоднородный характер химического обогащения МЗС галактики. Особое внимание уделено спектральному анализу самой яркой области галактики – Mrk 71, демонстрирующей сложный многокомпонентный спектр.

Дополнительной задачей был анализ мелкомасштабной (на шкале 20-30 пк) кинематики ионизованного газа в галактике NGC 2366. Для этого анализировались данные 3D-спектроскопии в линии $H\alpha$, полученные на интерферометре Фабри-Перро, установленном на телескопе БТА. Проведенный анализ позволил выявить 20 галактических областей с возмущенной кинематикой. Далее природа найденных источников определялась на основе анализа кинематических, фотометрических и спектральных данных.

¹Данная глава основана на работе (a3) из списка публикаций по теме диссертации

4.1 Анализ областей H II в галактике NGC 2366

Целью данной работы является определение физических параметров и химического состава областей H II в галактике NGC 2366, а также выявление областей, в которых влияние мощной механической обратной связи от массивных звёзд наиболее существенно. В данном разделе описаны этапы, необходимые для получения этих результатов.

4.1.1 выделение областей H II в галактике

Мы выделили 74 области H II в галактике NGC 2366 с помощью пакета *astrodendro*², по изображению в линии H α , полученному с узкополосным фильтром на 2,5-метровом телескопе КГО (см. Таб.1). Минимальный размер области был установлен равным 25 пикселей; при этом значения ниже уровня 5σ были замаскированы, а регионы с колебаниями потока в пределах 5σ были объединены. Затем все области с отрицательным интегральным потоком в изображениях в линиях [S II] или [O III] были исключены. Для обнаружения областей H II использовалась область, показанная на рис. 4.2а. Выделенные описанным способом области показаны на картах H α , [S II]/H α и [O III]/H β на рис. 4.2а, b и с соответственно.

Полученный каталог областей H II послужил основой для последующего анализа состояния ионизации и металличности газа по всей галактике. Отобранные области H II используются нами исключительно как ориентиры, определяющие положение и границы соответствующих морфологически связанных структур. Качественно полученная в данной работе локализация областей H II согласуется с результатами, представленными ранее в работах [174; 175].

²<https://github.com/dendrograms/astrodendro>

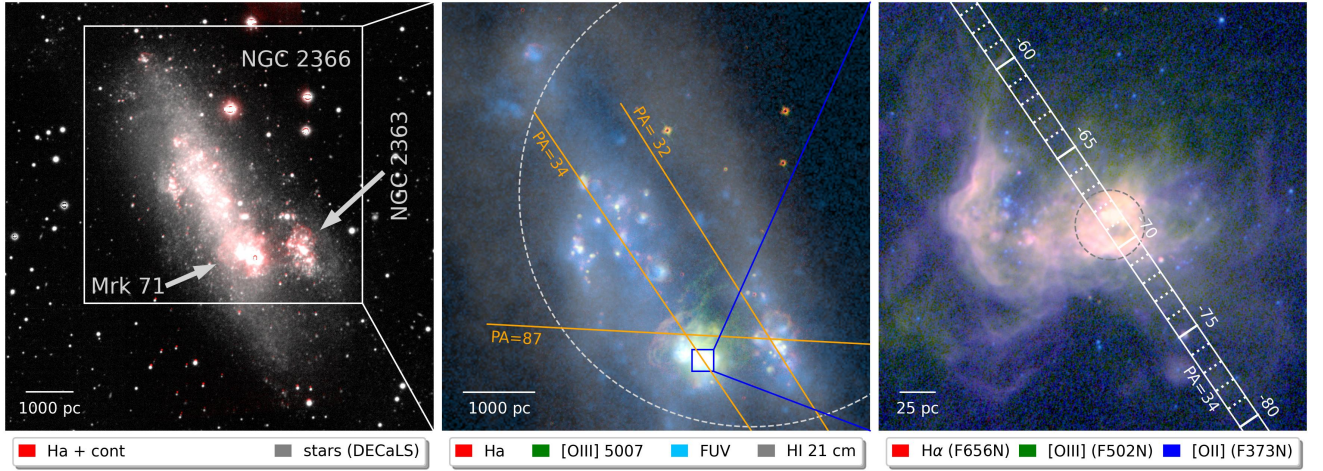


Рисунок 4.1 — Изображение галактики NGC 2366 (левая панель), а также увеличенные области её центральной части (средняя панель) и области Mrk 71 (правая панель). Левая панель показывает изображение в линии $H\alpha$ с континуумом (красный цвет; данная работа), совмещённое с изображением звёздного континуума (серый цвет; DECaLS; [170]). Средняя панель представляет собой совмещение изображений в эмиссионных линиях $H\alpha$ (красный; данная работа) и $[O\ III]$ (зелёный; данная работа), отображающих ионизованный газ; в дальнем УФ (синий; GALEX; [171]), отслеживающем молодое звёздное население; а также в линии $H\ I\ 21\ cm$ (серый; LITTLE THINGS; [172]), отслеживающей атомарный газ. На правой панели демонстрируется трёхцветное изображение области Mrk 71, полученное на основе узкополосных изображений HST с фильтрами F656N (центрирован на $H\alpha$; красный), F502N (центрирован на $[O\ III]$; зелёный) и F373N (центрирован на $[O\ II]$; синий) из работы [173]. Позиции длинной щели, соответствующие наблюдениям со SCORPIO-2, показаны жёлтыми линиями на средней панели, с увеличением области Mrk 71 для щели с $PA=34^\circ$ на левой панели. Белая пунктирная линия на средней панели указывает поле зрения, соответствующее данным ИФП. Серый круг на правой панели обозначает положение оболочки вокруг узла A [173].

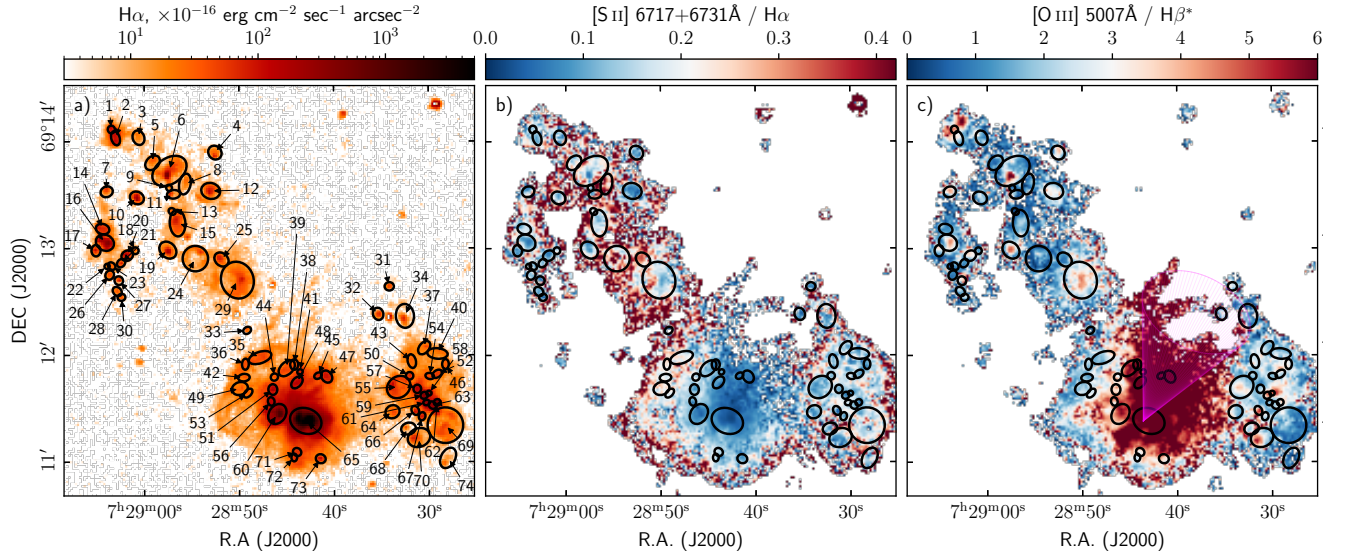


Рисунок 4.2 — Карты отношений эмиссионных линий в галактике NGC 2366, полученные из изображений в узкополосных фильтрах, соответствующих эмиссионным линиям $H\alpha$, $[S \text{ II}]$ и $[O \text{ III}]$. Панель ‘а’ демонстрирует карту NGC 2366 в линии $H\alpha$ с наложенными положениями областей $H \text{ II}$, определённых в данной работе. Панели ‘b’ и ‘с’ демонстрируют соотношения $[S \text{ II}]/H\alpha$ и $[O \text{ III}]/H\beta^*$ соответственно. Значения $H\beta^*$ получены как $H\alpha/3.1$, где коэффициент 3.1 соответствует наблюдаемому медианному значению отношения $H\alpha/H\beta$, полученному из длиннощелевых спектров (см. Табл. 10). Область Mrk 71 и область истечения газа (показанная фиолетовыми линиями на панели ‘с’) чётко выделяются, демонстрируя высокий уровень ионизации газа в галактике (высокое значение $[O \text{ III}]/H\beta$ и низкое отношение $[S \text{ II}]/H\alpha$.)

Таблица 9 — Параметры компонентов линии $H\alpha$, показанных на рис. 4.4, 4.5

#	область H II	RA(J2000)	DEC(J2000)	Комп. 1		Комп. 2		Комп. 3	
				V_1 , км с ⁻¹	σ_1 , км с ⁻¹	V_2 , км с ⁻¹	σ_2 , км с ⁻¹	V_3 , км с ⁻¹	σ_3 , км с ⁻¹
S1	1 (NGC 2366)	7:29:03.473	+69:14:05.05	-13	34	44	14	96	48
S2	8	7:28:47.252	+69:11:28.29	-6	22	44	33		
S3	25	7:28:28.519	+69:11:17.90	-5	14	45	84		
S4	55 (NGC 2363)	7:28:52.294	+69:12:53.69	-48	22	2	11		
S5	61 (NGC 2363)	7:28:54.853	+69:12:53.53	-116	19	-44	21		
S6	67	7:28:49.178	+69:12:12.06	-37	21				
S7	69 (NGC 2363)	7:28:46.378	+69:11:46.18	-29	27	31	61		
S8	24	7:28:47.558	+69:11:34.44	-14	21	36	5		
S9	19	7:28:45.715	+69:11:35.08	-48	30	8	21		
S10		7:28:43.015	+69:11:25.94	-114	36	3	16		
S11	44	7:28:38.467	+69:11:37.87	-73	12	-21	18		
S12	33	7:28:33.184	+69:11:39.74	-20	113	-3	38		
S13		7:28:55.924	+69:13:36.84	-63	8	-19	15		
S14	65 (Mrk 71)	7:28:30.155	+69:11:31.88	-27	24				
S15		7:28:45.842	+69:12:00.83	-23	26				
S16		7:28:40.135	+69:11:42.30	-15	32				
S17	65 (Mrk 71)	7:28:57.179	+69:12:54.34	-19	25				
S18	60	7:28:55.550	+69:13:05.03	-30	33				
S19	56	7:28:44.251	+69:11:26.82	-27	27				
S20	56	7:28:30.516	+69:11:25.80	-77	18	-27	23		

4.1.2 Мелкомасштабная кинематика ионизованного газа

Турбулентные движения ионизованного газа могут быть обусловлены различными причинами, такими как одиночные вспышки сверхновых, звёзды типов WR и LBV, а также молодые звёздные скопления. Для идентификации подобных источников, как и в главе 3, используется диаграмма “ $I-\sigma$ ”. Данная диаграмма была предложена как эффективный инструмент для поиска кинематически пекулярных объектов (таких как расширяющиеся оболочки, неразрешённые остатки сверхновых и звёздные источники с мощными звёздными ветрами) и отделения их от стандартных областей H II и диффузного ионизованного газа (DIG), на основе информации о поверхностной яркости и дисперсии скоростей ионизованного газа (см. подробное описание метода в главе 1.2.1). В настоящей работе применяется модификация метода с использованием классификации, предложенной в работе [176]. На рис. 4.3 представлены диаграмма $I-\sigma$ для NGC 2366 и соответствующая классификационная карта, а также карты потока в линии $H\alpha$ и дисперсии скоростей, полученные по данным наблюдений на ИФП. В случае галактики NGC 2366 применялась более сложная методика разделения диаграммы I -sigma на различные области по сравнению с горизонтальными и вертикальными линиями раздела, используемыми в более раннем исследовании NGC 4068 (см. главу 3).

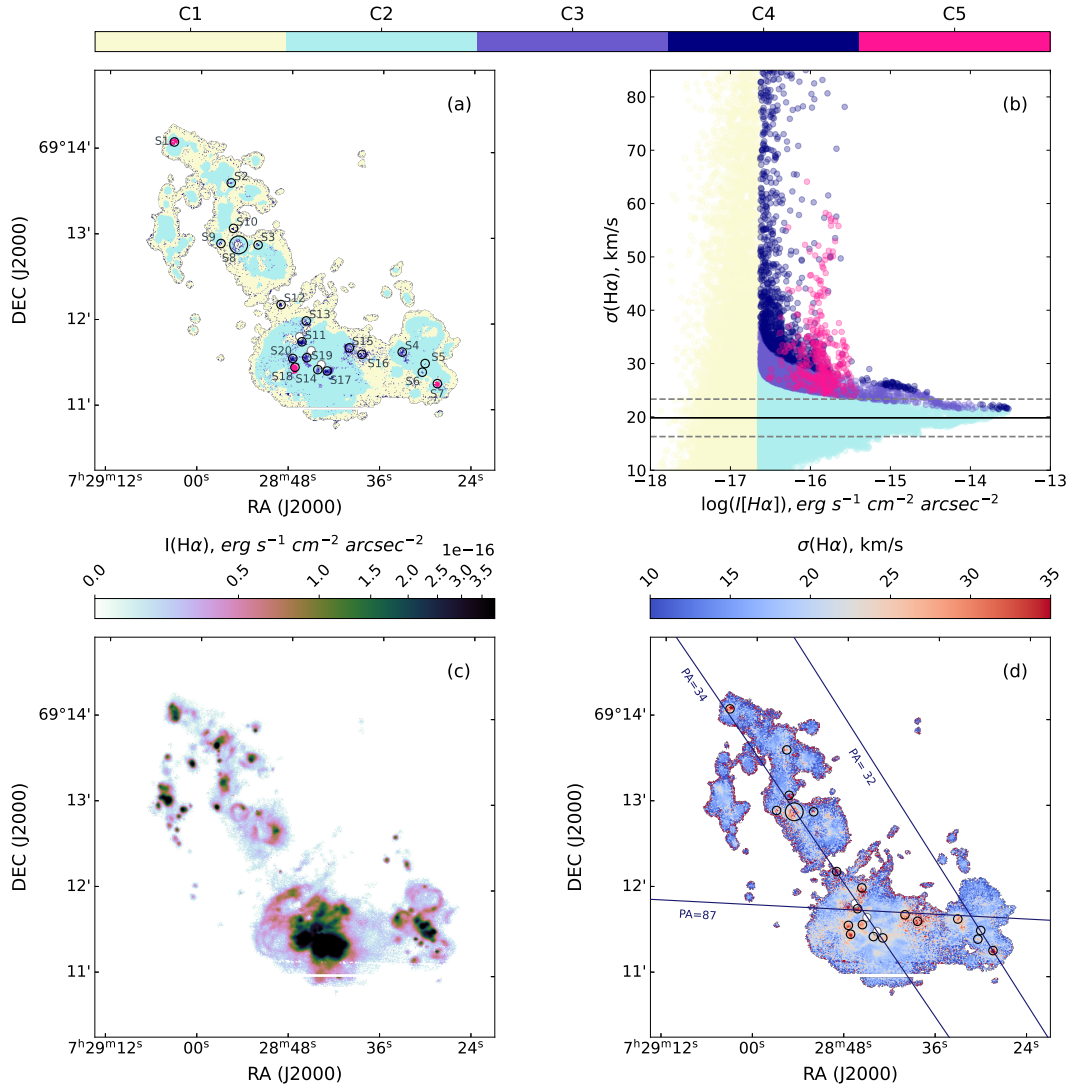


Рисунок 4.3 — Карта классификации источников (а) и I – σ диаграмма (b), окрашенные в соответствии с классификацией, описанной в тексте (см. раздел 4.1.2). Класс C1 соответствует диффузному ионизованному газу, C2 — областям H II, C3 — промежуточному классу с повышенной дисперсией скоростей, C4 — областям возмущённого ионизованного газа (например, расширяющимся оболочкам и турбулентной МЗС), C5 — кандидатам в отдельные источники с высокой механической энергией. Для сравнения представлены изображение в линии H α (c) и карта дисперсии скоростей (d). На панели (b) показаны взвешенное среднее значение дисперсии скоростей (сплошная линия) и его 1σ -отклонение (пунктирные линии); на панели (d) наложены положения щелей при длиннощелевой спектроскопии. Объекты, идентифицированные в разделе 4.1.2 и пространственно неразрешённые в наших данных, обозначены кружками, за исключением одного объекта с явно выраженной оболочечной морфологией, выделенного большим кругом.

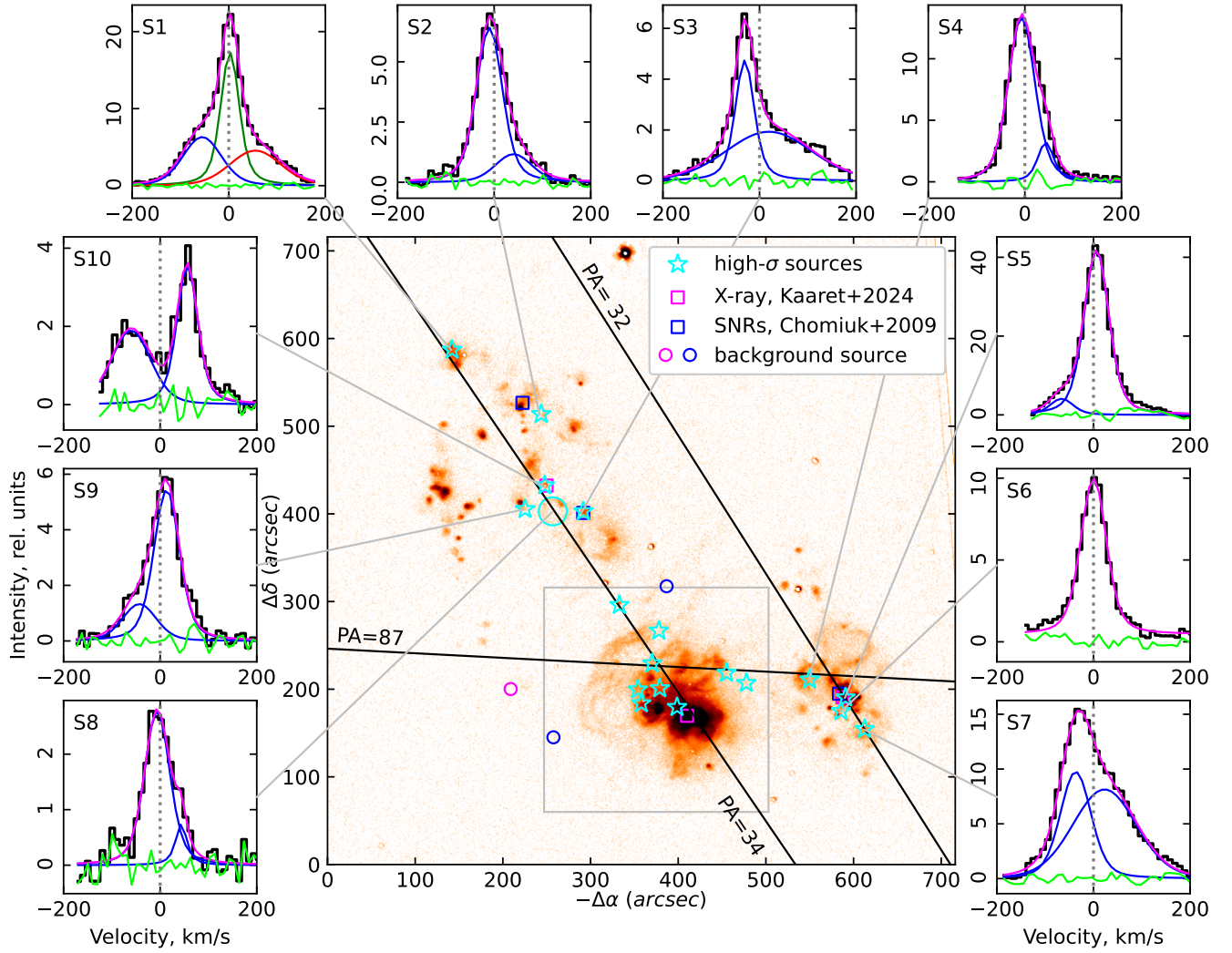


Рисунок 4.4 — Профили областей с высокой дисперсией скоростей, выявленные по данным интерферометрии Фабри-Перро. Центральная панель показывает распределение интенсивности в линии $\text{H}\alpha$ и положение щелей, используемые при последующей спектроскопии на телескопе БТА (чёрные линии). Положения областей с турбулентными движениями, обнаруженных в данной работе, обозначены голубыми звёздами и кругом, тогда как рентгеновские источники и остатки сверхновых из предыдущих исследований отмечены розовыми и тёмно-синими квадратами соответственно. Боковые панели демонстрируют профили линии $\text{H}\alpha$ в выделенных областях. На боковых панелях также показаны модели спектральной линии с вписанными компонентами Фойгта (от 1 до 3 компонент, обозначены розовым цветом), отдельные компоненты (тёмно-синий), а также остатки после вычитания модельного спектра (светло-зелёный). Центральный квадрат соответствует области, показанной на рис. 4.5.

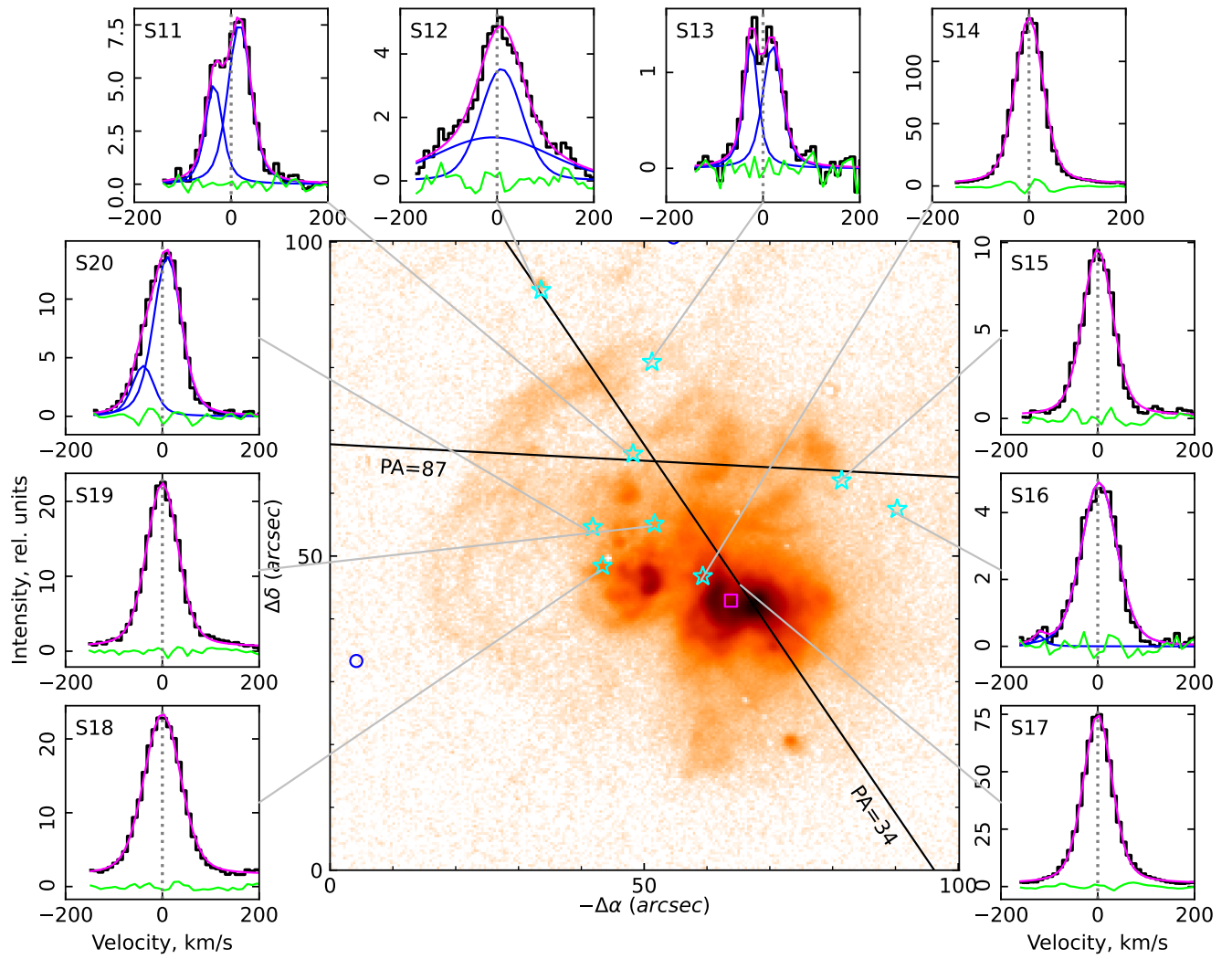


Рисунок 4.5 — То же, что и на рис. 4.4, но для области Mrk 71 и её окрестностей.

Медианное значение поверхностной яркости по всем пикселям с отношением сигнал/шум $S/N > 3$, представленным на диаграмме, составляет $I[\text{H}\alpha]_{\text{median}} = 2.35 \times 10^{-17} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ угл. с}^{-2}$. Области с пониженной яркостью в линии $\text{H}\alpha$ (то есть те, для которых $I[\text{H}\alpha] < I[\text{H}\alpha]_{\text{median}}$) мы рассматриваем как области доминирующего диффузного ионизованного газа или как содержащие значительные погрешности при определении дисперсии скоростей. Эти области обозначены как С1 на рис. 4.3 (см. цветовую шкалу в верхней части рисунка).

Для областей с $I[\text{H}\alpha] > I[\text{H}\alpha]_{\text{median}}$ мы измерили средневзвешенное по потоку значение внутренней дисперсии скоростей в линии $\text{H}\alpha$ и его стандартное отклонение: $\sigma_m \pm \sigma_{\text{std}} = 19.8 \pm 3.5 \text{ км/с}$ (сплошная чёрная и пунктирные серые линии на рис. 4.3b). Это значение характерно для большинства областей, которые могут быть интерпретированы как не возмущённые области Н II. Все пиксели, для которых $\sigma(\text{H}\alpha) < \sigma_{\text{norm}}$, классифицированы нами как С2, где σ_{norm} описывается гауссовой кривой со стандартным отклонением $0.8\sigma_{\text{std}}$ и центром в σ_m [подробнее см. в работе 176].

Класс С3 соответствует пикселям, попадающим в пределы $1.5\sigma_{\text{std}}$ для соответствующего значения $\log(I)$, тогда как пиксели класса С4 имеют значения σ выше этого предела. Спаксели, отнесённые к классу С4, могут соответствовать расширяющимся оболочкам или областям ионизованного газа, в которых доминируют турбулентные движения, тогда как пиксели класса С3, как правило, окружают такие области. После визуальной проверки отобранных источников классов С3–С4, среди них были выделены объекты, пиксели которых формируют треугольную или диагональную структуру на диаграмме I – σ , и отнесли их в отдельный класс С5. Такая форма является характерным признаком мощных источников механической энергии, таких как остатки сверхновых, звёзды типа WR и LBV [см., например, 67]. Класс С5 включает три объекта — S1, S7 и S18. Отметим, что объект S8 представляет собой единственную разрешённую оболочечную структуру с яркими краями и повышенной дисперсией скоростей в центральной части (класс С3).

Мы провели многокомпонентный анализ отобранных источников с целью детального изучения их кинематических свойств. Пространственное разрешение сканирующей интерферометрии Фабри–Перо (ИФП) составляет $2''$, что эквивалентно 32 пк. Таким образом, в данном случае рассматривается мелко-масштабную кинематику в галактике NGC 2366. На рис. 4.4 и 4.5 представ-

лены положения выявленных источников на карте $H\alpha$, а также их профили в этой линии совместно с результатами многокомпонентного фиттинга функциями Фойгта. За нулевое значение скорости принят первый статистический момент каждого профиля. Основные кинематические параметры приведены в таблице 9.

4.1.3 Состояние ионизации эмиссионных областей

Для определения состояния ионизации газа и его металличности на следующем этапе были получены интегральные спектры областей $H II$ в пределах заданных границ, которые показаны на рис. 4.8 вертикальными серыми линиями. Отметим, что для областей 1, 44, 45 и 63 щели пересекают лишь внешние части выделенных областей $H II$, что может привести к смещению измеренных соотношений линий, а следовательно — к ошибкам в оценке температуры и содержания тяжёлых элементов.

Оценка потоков эмиссионных линий и ошибок потоков производилась стандартными методами, описанными в главе 1. Вклад звёздных линий поглощения из спектров при этом не вычитался, так как он пренебрежимо мал, что следует из оценок эквивалентных ширин эмиссионных линий серии Бальмера и соответствующих абсорбционных эквивалентных ширин. Согласно работе [177], эквивалентные ширины (EW) линий поглощения в области Mrk 71 составляют $0.6 \pm 0.7 \text{ \AA}$, что существенно меньше эквивалентных ширин эмиссионных линий Бальмера в этой же области (нами получено значение $EW_{H\alpha} \sim 2000$ для области Mrk 71).

Спектры, полученные в настоящей работе при положениях щели $PA=32^\circ$, 34° и 87° , охватывают 24 области звездообразования. Щель с $PA=87^\circ$ проходит через область конического газового истечения в Mrk 71 (см. рис. 4.1) и пересекает яркую область NGC 2363, морфологически отделенную от основного тела галактики. Щель с положением $PA=32^\circ$ также проходит через NGC 2363, включая её яркий центр. Наконец, щель с $PA=34^\circ$ пересекает область S1, характеризующуюся сложным профилем линии $H\alpha$ с тремя компонентами, а также самую яркую область звездообразования в NGC 2366 – Mrk 71.

Структура Mrk 71 довольно сложна, поэтому мы разделили её на четыре области — 65, 65A, 65B и 65C. Область 65 соответствует наиболее яркой области в центре Mrk 71 (отмечена серым кругом на рис. 4.1; эта область совпадает с анализируемой в работе [177] и относится к узлу A (в литературе - knot A)). Область 65B охватывает часть конического истечения, близкую к его началу в районе Mrk 71, а область 65C расположена за пределами области истечения. Область 65A находится на противоположной стороне от 65B относительно области 65.

В данном разделе представлено исследование условий ионизации газа, основанное как на длиннощелевой спектроскопии отдельных областей, так и на данных узкополосной фотометрии.

Отношения интенсивностей сильных эмиссионных линий широко используются как индикаторы условий ионизации газа, позволяя различать фотоионизацию массивными звёздами, жёсткое ионизирующее излучение, ударные волны и смешанные механизмы возбуждения газа (см. 1.2.2, [91]). Так, повышенные отношения линий $[\text{O III}]/\text{H}\beta$ и $[\text{O III}]/[\text{O II}]$ свидетельствуют о жёстком ионизирующем излучении и возможном истечении ионизирующих фотонов из областей H II, в то время как высокое значение $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ часто используется как индикатор ударных волн.

На рис. 4.8 показано распределение следующих параметров вдоль щели: дисперсия скоростей (d, e, f), отношения линий $\text{H}\alpha$, $[\text{S II}]$, $[\text{O III}]$ и $[\text{N II}]$ для различных положений щели (g, h, i), а также содержание кислорода $12 + \log(\text{O}/\text{H})$, оцененное методом электронной температуры T_e и по S-калибровке (см. [69]) для областей H II, пересечённых щелями (g, k, j; см. сек. 4.1.4). Для построения этих распределений каждая эмиссионная линия аппроксимировалась вдоль щелей попиксельно с помощью однокомпонентного профиля Гаусса.

Для более детального анализа состояния ионизации исследуемых областей H II были построены диагностические ВРТ-диаграммы на основе полученных длиннощелевых данных (построение диагностических диаграмм подробно описано в главах 1, 3; диаграммы для галактики NGC 2366 представлены на рис. 4.9). Для сравнения на диаграмму нанесены отношения $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ к $[\text{O III}]/\text{H}\beta$, полученные из наших фотометрических карт для выделенных областей H II (см. сек. 4.1.1), они показаны в виде кружков с цветовой кодировкой

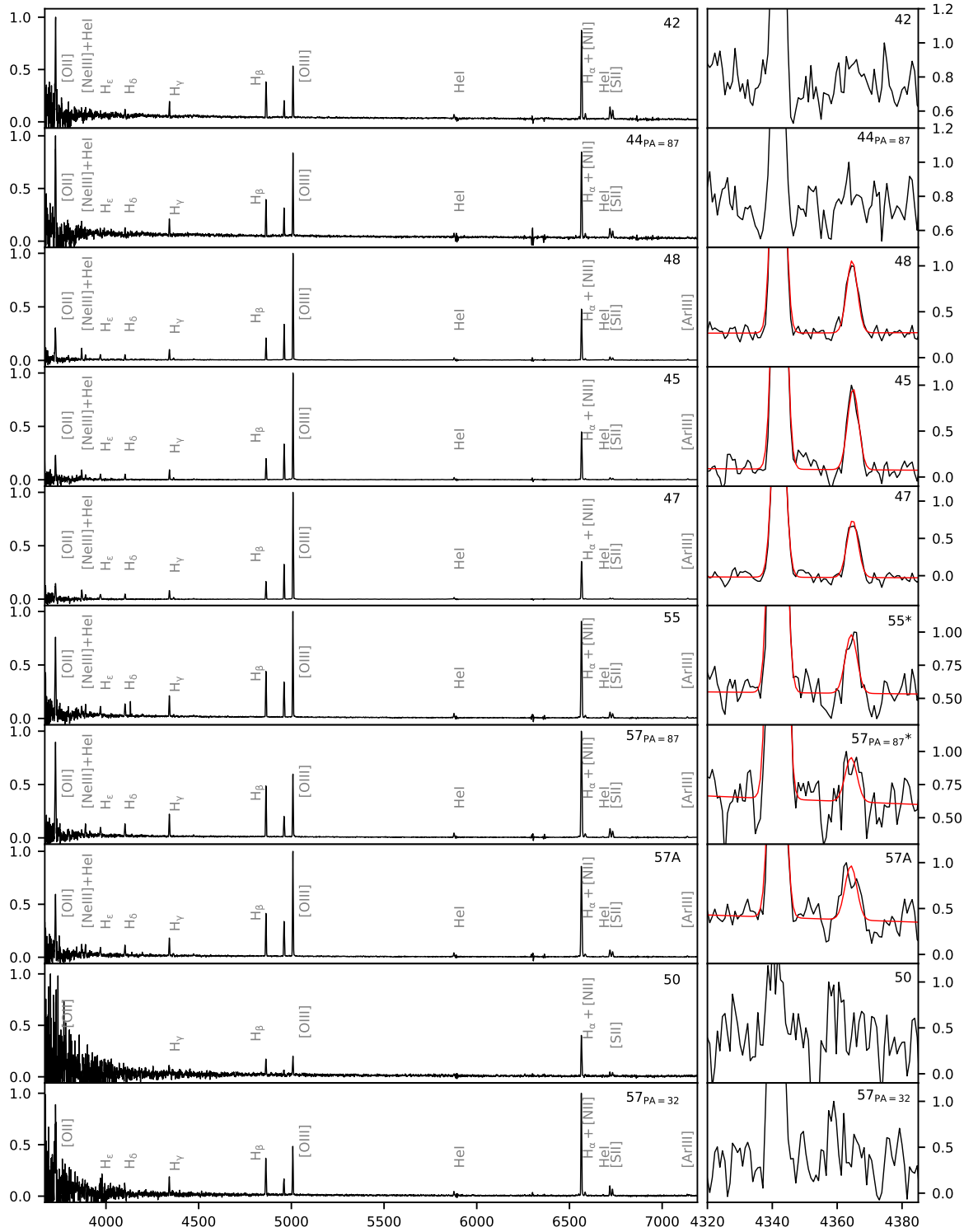


Рисунок 4.6 — Длиннощелевые спектры областей Н II, пересечённых щелями $PA=87^\circ$ и $PA=32^\circ$, соответствующие пределам суммирования для оценки содержания кислорода $12 + \log(O/H)$. Каждый спектр сопровождается дополнительной панелью с увеличенным участком линии $[O\ III]\ \lambda 4363$, на которой показана аппроксимация линии для тех спектров, где отношение $S/N_{[OIII]} > 3$. Для определения температуры в областях методом T_e часть спектров была усреднена в более узких пределах, соответствующих диапазону видимости линии $[O\ III]\ \lambda 4363$. Такие области отмечены символом «*».

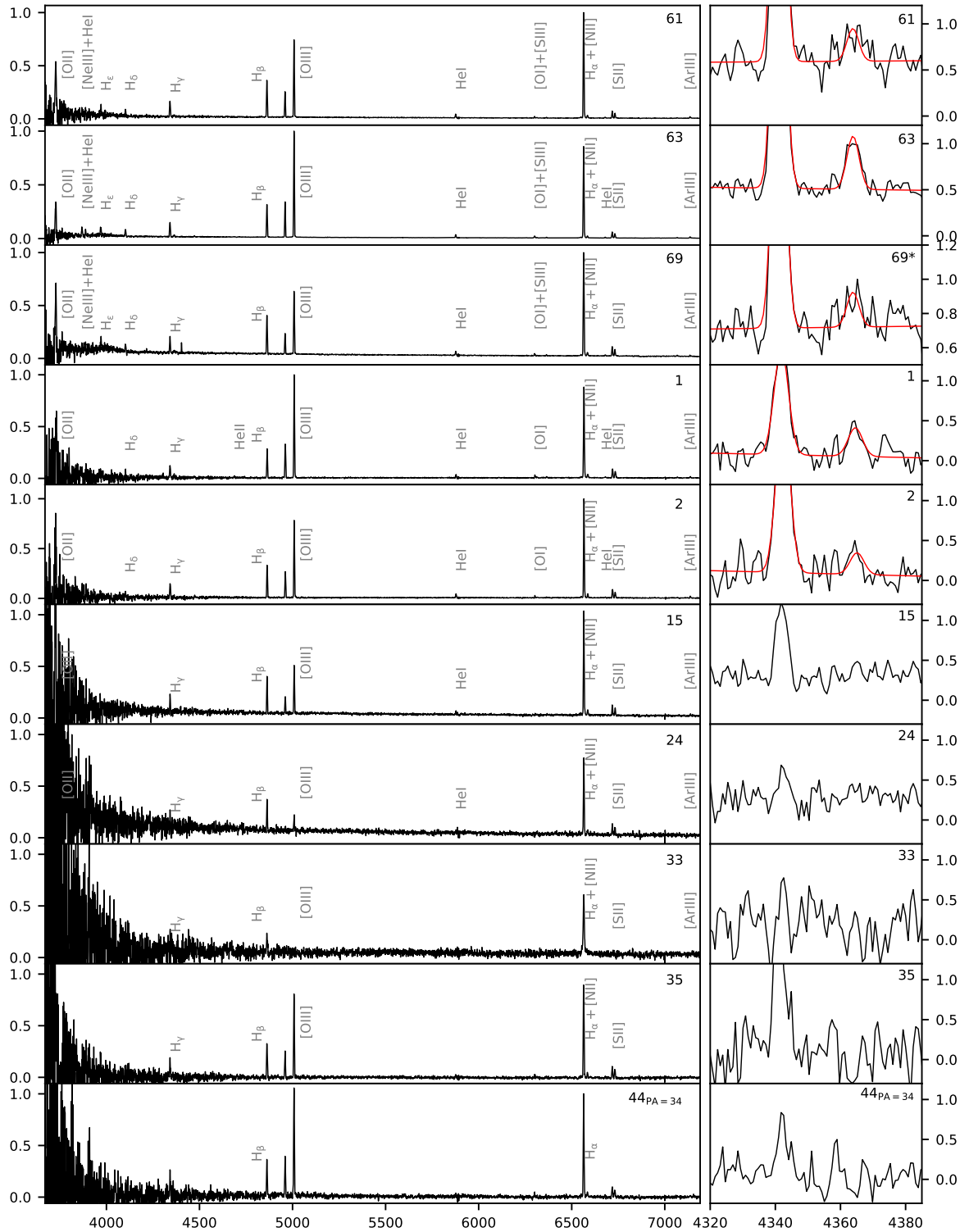


Рисунок 4.7 — То же, что на рис.4.6 для длиннощелевых спектров областей Н II, пересеченных щелями PA=32° и PA=34°.

по дисперсии скоростей, чтобы выделить области с повышенной дисперсией. Отдельными символами на рис. 4.9 обозначены области Mrk 71 и NGC 2363.

Демаркационная линия между областями, ионизованными преимущественно УФ излучением массивных звезд, и областями, в которых возможен вклад других механизмов ионизации при металличности, соответствующей металличности галактики NGC 2366, определена эмпирически в виде огибающей моделей [63] на диаграмме $[S\ II]/H\alpha$ против $[O\ III]/H\beta$. Эта граница показана на рис. 4.9 голубой пунктирной линией. Области, рассмотренные в данной работе, в основном располагаются внутри выбранной сетки моделей фотоионизации. Однако для тех областей, которые находятся за пределами указанной линии, нельзя исключить вклад ударного возбуждения в совокупную ионизацию газа.

4.1.4 Металличность ионизованного газа

Согласно представленным ВРТ-диаграммам, большинство областей, пересечённых длинными щелями, демонстрируют преимущественно фотоионизационный механизм возбуждения. Следовательно, для оценки содержания кислорода в этих областях можно использовать прямой метод, основанный на измерении электронной температуры (T_e), а также эмпирические калибровки по интенсивностям сильных эмиссионных линий. Прямой метод подробно описан в главе 1; там же описан метод измерения плотности по линиям $[S\ II]\lambda 6716,6731$. Для измерений электронной температуры спектры были проинтегрированы в пределах области, где линия $[O\ III]\lambda 4363$ обнаруживается на уровне $> 3\sigma$ в каждом пикселе вдоль щели для каждой области. Предполагается, что полученное таким образом значение T_e является репрезентативным для зоны с высокой степенью ионизации (O^{2+}) во всей области. Аналогично, при последующей оценке содержания иона (O^+) область интегрирования была ограничена зоной с измеримой линией $[O\ II]\lambda 3727$. Спектры областей, включая увеличенный фрагмент с линией $[O\ III]\lambda 4363$, представлены на рис. 4.6 и 4.7.

Для всех исследованных областей, за исключением 65, 65A и 65B, соответствующих Mrk 71, значение плотности n_e близко к пределу низкой плотности для данного метода ($\sim 30\text{см}^{-3}$), при котором точная оценка невозможна из-за

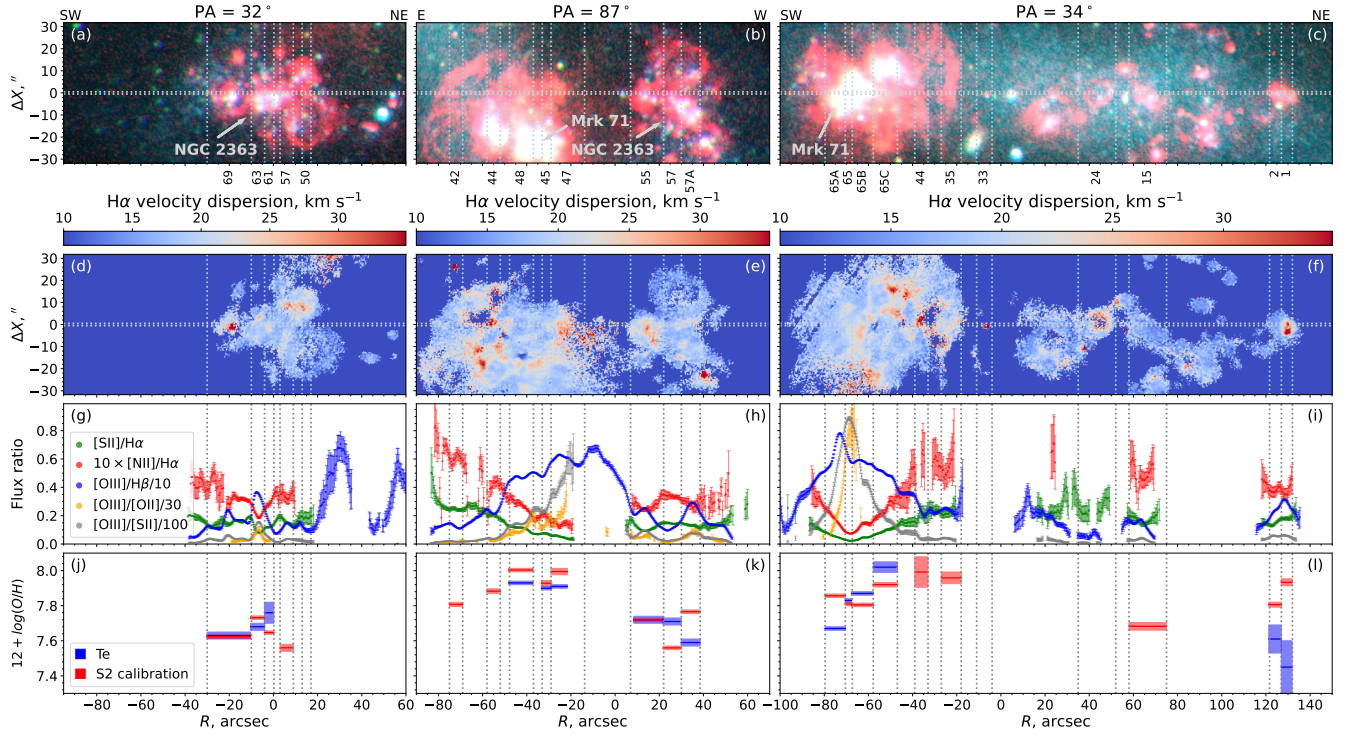


Рисунок 4.8 — Положения щелей наложены на цветное изображение (в фильтрах $V + V + H\alpha$) галактики NGC 2366 (a,b,c) и на карту дисперсии скоростей (d,e,f). Распределения отношений интенсивностей эмиссионных линий вдоль щелей для линий $H\alpha$, $[S II]$, $[O III]$ и $[N II]$ приведены на панелях g,h,i для углов положения $PA=32^\circ$ (слева), $PA=87^\circ$ (в центре) и $PA=34^\circ$ (справа). Нижние панели (j,k,i) показывают оценки содержания кислорода ($12 + \log(O/H)$), полученные методом T_e и S-калибровкой.

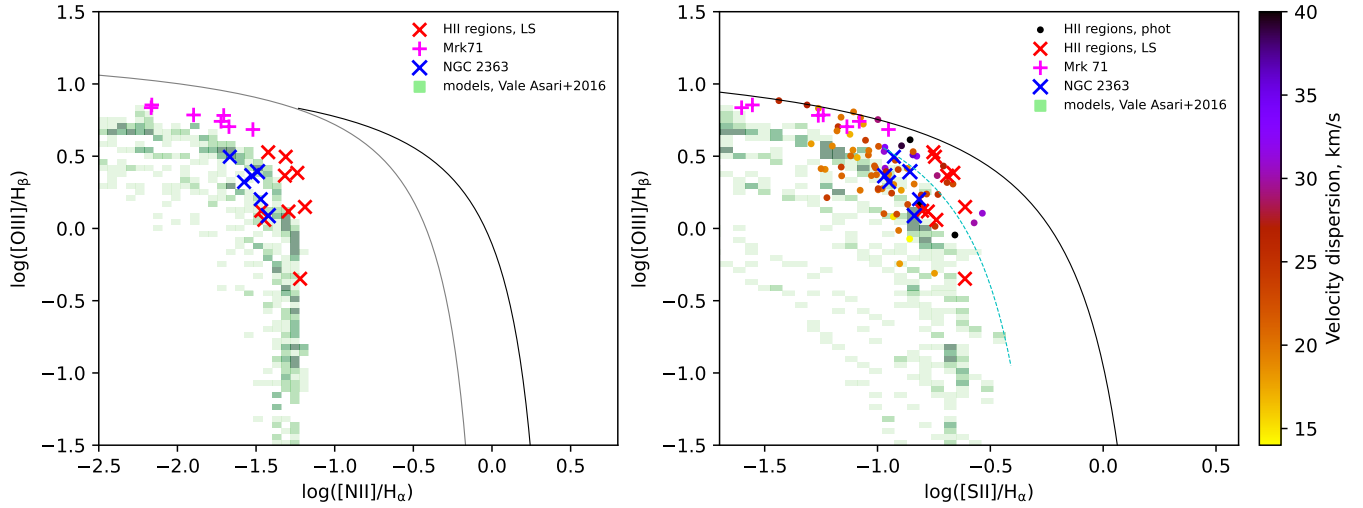


Рисунок 4.9 — Диагностическая ВРТ-диаграмма, основанная на разделительных кривых из работ [61] (чёрная линия) и [62] (серая линия), показывающая границу между фотоионизованными областями (слева от линий) и областями с существенным вкладом ударного возбуждения. Модели из работы [63] для содержания кислорода $12 + \log(O/H) = 8.0$ и отношения $N/O = -1.5$ представлены в виде зелёной гистограммы с цветовой шкалой, обозначающей плотность ячеек сетки моделей фотоионизации в зависимости от соотношений линий. Голубая пунктирная линия разделяет области, в которых может присутствовать вклад ударных волн в ионизацию (см. раздел 4.1.3).

Также показано соотношение $[S II]/H\alpha$ vs $[O III]/H\beta$, полученное по фотометрическим данным с 2,5-м телескопа КГО в узкополосных фильтрах $[S II]$, $H\alpha$ и $[O III]$ совместно с соответствующей дисперсией скоростей для каждой из областей, оцененной по наблюдениям ИФП (цветовая шкала).

Показаны положения исследуемых областей по данным щелевой спектроскопии: Mrk 71 (розовый «+»), NGC 2363 (синий «x») и другие регионы (красный «x»).

Таблица 10 — T_e и $12 + \log(O/H)$, определенные T_e -методом.

цель	область	N_{reg}	$T_e, 10^3 \text{K}$	$12 + \log(\text{O}/\text{H})$	$\log(\text{N}/\text{O})$
PA=87°	outflow	48	14.11 ± 0.17	7.93 ± 0.02	-1.40 ± 0.02
		45	14.23 ± 0.26	7.90 ± 0.02	-1.43 ± 0.04
		47	14.6 ± 0.2	7.91 ± 0.01	-1.35 ± 0.03
	NGC 2363	55	14.3 ± 0.5	7.72 ± 0.02	-1.43 ± 0.03
		57	13.8 ± 0.6	7.71 ± 0.02	-1.45 ± 0.02
		57A	16.0 ± 0.5	7.59 ± 0.02	-1.31 ± 0.03
PA=32°		61	14.6 ± 1.3	7.76 ± 0.06	-1.62 ± 0.06
	63	15.6 ± 0.3	7.68 ± 0.02	-1.50 ± 0.04	
	69	15.9 ± 0.8	7.63 ± 0.03	-1.51 ± 0.03	
PA=34°	NGC 2366	1	22.3 ± 2.0	7.4 ± 0.1	-1.35 ± 0.24
		2	18.1 ± 2.7	7.61 ± 0.08	-1.48 ± 0.16
	Mrk 71	65	16.12 ± 0.05	7.83 ± 0.01	-1.394 ± 0.012
		65A	18.31 ± 0.09	7.67 ± 0.01	-1.516 ± 0.014
		65B	14.92 ± 0.06	7.90 ± 0.01	-1.446 ± 0.025
		65C	13.5 ± 0.4	8.02 ± 0.03	-1.66 ± 0.05

вырождения модели. Поэтому для дальнейших расчётов химического состава мы зафиксировали плотность в этих областях на уровне $\sim 30 \text{ cm}^{-3}$. Отметим, что оценка металличности практически не зависит от изменений n_e в режиме низкой плотности, типичном для областей Н II. Для регионов 65, 65A и 65B были получены значения $n_e = 250, 100, 150 \text{ cm}^{-3}$ соответственно.

Далее, учитывая определённые на предыдущем шаге значения температуры и электронной плотности, возможно проведение расчета содержания кислорода и азота (проводилось с помощью пакета PYNEB, как описано в главе 1).

Для 21 области Н II были измерены интегральные потоки в линиях [O III], H β , [N II] и [S II], необходимые для применения эмпирической S-калибровки [см. уравнения 6,7 в 69]. Несмотря на то, что данный метод в целом согласуется с методом T_e (так как он откалиброван на областях Н II с измеренным T_e), его точность ниже, и он может быть более чувствителен к изменениям условий ионизации, что приводит к отклонениям от свойств типичных для областей Н II. В частности, поскольку отношение [S II]/H α чувствительно к ударным волнам и диффузному ионизованному газу (DIG), их наличие может существенно повлиять на измеренные значения металличности.

Для оценки электронной температуры T_e , а также содержания кислорода и азота, использовались только основные компоненты линий $H\alpha$ и $[O\ III]$. Согласно критерию $O^+/(O^+ + O^{2+}) < 0.1$ из работы [178], два центральных спектра демонстрируют высокий уровень возбуждения, поэтому для этих двух областей мы рассчитали также поправочный ионизационный коэффициент (ICF) к значению $12 + \log(O/H)$. В обоих случаях значение ICF не превышает 1% от $(O^+ + O^{2+})/H$. Измеренные значения электронной температуры и содержания химических элементов (O, N) приведены в Таблице 10.

4.2 Результаты и обсуждение

Используя длиннощелевые данные и данные 3D-спектроскопии, мы исследуем ряд областей $H\ II$ в карликовой бедной металлами галактике NGC 2366, выявляя сложную кинематику, повышенную дисперсию скоростей или многокомпонентные профили линий по данным ИФП-спектроскопии. Длиннощелевые спектры были получены для области Mrk 71, участков, совпадающих с истечением ионизованного газа в Mrk 71, NGC 2363, а также для 9 объектов, демонстрирующих многокомпонентные профили в данных ИФП (см. рис. 4.4). Ниже обсуждается возможная природа этих объектов, а также приводятся оценки физических параметров областей $H\ II$.

4.2.1 Исследование кандидатов в звезды WR и остатки сверхновых

Используя данные, полученные на сканирующем ИФП, установленном на телескопе БТА, мы выявили 20 кинематически пекулярных областей, демонстрирующих широкие или многокомпонентные профили в линии $H\alpha$. Эти области обозначены как S1–S20 на рис. 4.3 и в табл. 9, а также отмечены голубыми звёздами на рис. 4.4, 4.5. Ниже обсуждается возможная природа этих источников.

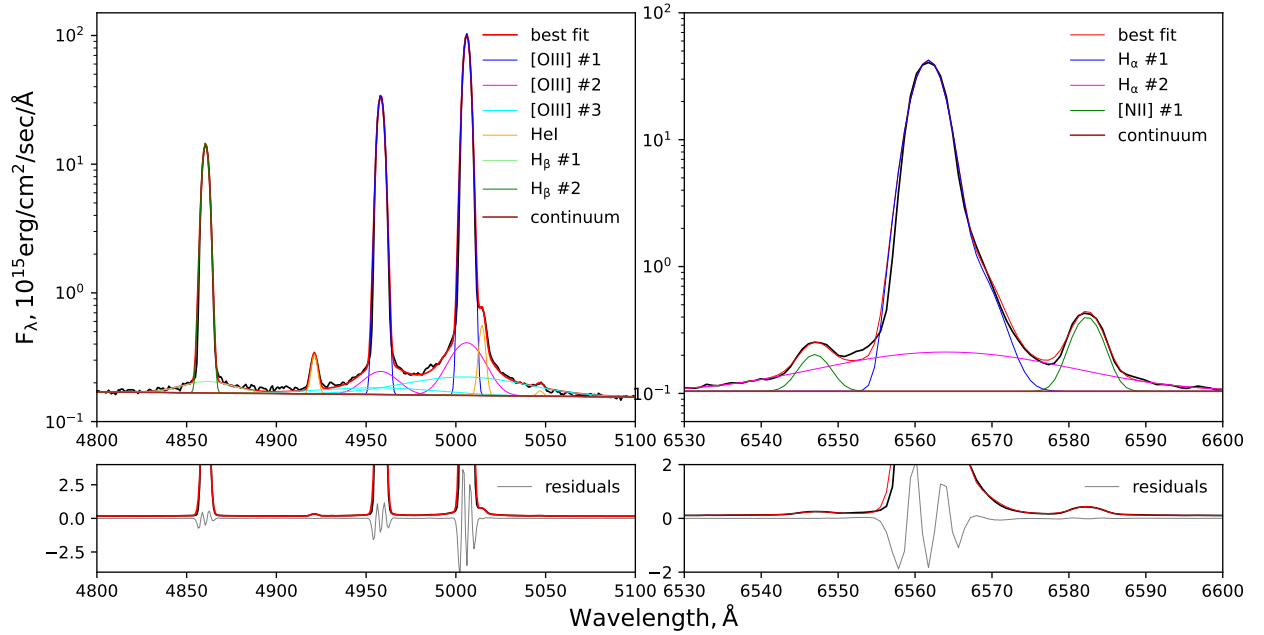


Рисунок 4.10 — График демонстрирует две области спектра 65 (центральная часть Mrk 71) вблизи спектральных линий $H\alpha$ и $[O III]$, демонстрирующие наличие широких компонент. Для получения надёжной модели спектра все линии в каждом спектральном окне были аппроксимированы одновременно.

На двух верхних панелях представлены спектры в логарифмическом масштабе (показаны чёрным цветом), на которые наложены наилучшие модельные аппроксимации (красным) и их отдельные компоненты. На нижних панелях показаны те же области спектра в линейном масштабе с учётом ошибок (серым цветом).

Мы нанесли все исследуемые области на диаграмму ВРТ, чтобы определить возможный вклад ударных волн в их ионизацию (так же, как и в случае галактики IC 1613; см. главу 2). Хотя все объекты располагаются внутри области на диаграмме, соответствующей фотоноионизации излучением массивных звезд согласно моделям с солнечной металличностью, исследования других карликовых галактик с низкой металличностью показывают [например 179—181], что сопоставление с моделями фотоноионизации, адаптированными под измеренную металличность [см. 63; 182], позволяет более надёжно определить механизмы возбуждения для конкретных источников. Согласно моделям [63], объекты S1, S2, S3, S11 лежат за пределами области фотоноионизации (см. голубую демаркационную линию на рис. 4.9). Следовательно, можно заключить, что для этих четырёх объектов фотоноионизация не может полностью объяснить наблюдаемые соотношения линий, и другие механизмы возбуждения (например, ударные волны) могут вносить вклад в их ионизацию. Дополнительно мы выделяем объекты S3 и S5, так как они являются кандидатами в остатки сверхновых (согласно работам [174; 183; 184], см. также рис. 4.4), а также объект S10, совпадающий с рентгеновским источником [185; 186]. Для объяснения природы остальных объектов наблюдательных данных на данный момент не хватает.

Яркая область H II S1 представляет особый интерес благодаря трёхкомпонентному профилю линии $\text{H}\alpha$ (см. объект S1 на рис. 4.4). Яркая компонента линии $\text{H}\alpha$ вероятно связана с центральным источником, тогда как две широкие компоненты обусловлены расширяющейся оболочкой вокруг него. Исходя из этого предположения была оценена скорость расширения оболочки: $v=55 \text{ км с}^{-1}$; верхний предел её возраста составляет соответственно < 1 млн лет (оболочка не разрешается на полученных изображениях, поэтому возможно лишь оценить верхний предел её размера). Полученные значения физических параметров указывают на наличие высокоэнергетического центрального источника, такого как, например, звезда Вольфа–Райе либо остаток сверхновой. Объект располагается вне зоны фотоионизации на диаграмме ВРТ (см. рис. 4.9), что позволяет предположить вклад ударных волн в процесс возбуждения газа. При этом спектр области S1, полученный по данным длиннощелевых наблюдений, демонстрирует слабую эмиссионную линию $\text{He II } \lambda 4686$ с эквивалентной шириной $EW = 14.5 \text{ \AA}$ и отношением сигнал/шум $S/N = 3$. Линия $\text{He II } \lambda 4686$ является распространённым индикатором, указывающим на наличие звёзд Воль-

фа-Райе типа WN. Она также указывает на высокую температуру в области, что согласуется с нашей оценкой электронной температуры T_e , которая в данной области является наиболее высокой для всей галактики и составляет 22 кК (см. табл. 10). Всё вышеперечисленное позволяет рассматривать данный объект как кандидата в WR-звёзды.

В настоящее время в галактике NGC 2366 известно несколько звёзд типа WR (см. [187; 188]) и одна звезда типа LBV [189]. Однако все эти ранее обнаруженные объекты расположены в узле В (knot В) области Mrk 71, далеко от обнаруженной области S1. Таким образом, мы обнаружили нового кандидата в WR-звёзды в северной части галактики NGC 2366. Тем не менее, для подтверждения наличия эмиссионной линии He II λ 4686 желательны дополнительные наблюдения с большим значением S/N в этой линии.

Другими примечательными объектами являются S2 и S11, демонстрирующие двухкомпонентные профили линии H α , а также объект S3, в спектре которого наблюдается широкая компонента линии H α . Согласно моделям [63], все они располагаются за пределами зоны фотоионизации на BPT-диаграмме. В отличие от S1, ни один из этих объектов не демонстрирует излучения в линии He II, что характерно для остатков сверхновых (ОСН). Объект S3 уже упоминался в ряде предыдущих работ как кандидат в ОСН [174; 183], и наши кинематические данные подтверждают его статус. Объекты S2 и S11 далее рассматриваются как новых кандидатов в ОСН. Ещё один ранее известный кандидат в ОСН совпадает с нашим объектом S5, который демонстрирует асимметричный профиль линии H α . Тем не менее, он находится внутри зоны фотоионизации на BPT-диаграмме, при значении $[S II]/H\alpha = 0.11-0.15$, и, следовательно, его интерпретация как ОСН остаётся неочевидной. Отметим, что на измеренное значение могут существенно повлиять соседние области ионизованного водорода.

Ещё один примечательный объект — S10. Он демонстрирует двухкомпонентный профиль линии H α , расстояние между компонентами составляет 117 км/с. Объект также совпадает по координатам с двумя рентгеновскими источниками: XMMU J072855.4+691305 и XMMU J072851.7+691255 [185]. Первый из них обладает светимостью 6×10^{36} эрг с $^{-1}$, что сопоставимо со значениями для массивных двойных звёзд в Галактике; второй — более слабый и частично перекрывается с первым. Его происхождение может быть связано с двойной си-

стемой или с протяжённой областью горячей плазмы. Все перечисленные характеристики позволяют рассматривать S10 как кандидата в остаток сверхновой или как рентгеновскую двойную систему.

В галактике также присутствуют интересные объекты неясной природы. Один из них — S12, демонстрирующий выраженную широкую компоненту $H\alpha$. Это привлекает внимание, поскольку широкие эмиссионные компоненты часто интерпретируются как кинематический признак ударных волн. Однако его спектр не содержит линий металлов, необходимых для определения типа ионизации по BPT-диаграмме. Объект S7 также представляет интерес, поскольку он демонстрирует вторую яркую и широкую компоненту $H\alpha$ и чётко выраженную треугольную форму на диаграмме $I-\sigma$. Это свидетельствует о его высокой энергетике, однако он находится в пределах зоны фотоионизации на BPT-диаграмме и имеет температуру $T_e = 16\,000$ К. Следовательно, объект S7 вряд ли является остатком сверхновой, но при этом в настоящий момент недостаточно данных, чтобы рассматривать его как кандидата в WR-звёзду.

Подводя итог, на основе анализа данных ИФП и длиннощелевой спектроскопии мы заключаем, что область S1 является кандидатом в звёзду Вольфа–Райе, окружённую расширяющейся оболочкой; объекты S2 и S11 — новые кандидаты в остатки сверхновых; объект S10 может быть как кандидатом в остаток сверхновой, так и в рентгеновскую двойную систему. Статус объекта S3 как надежного кандидата в остаток сверхновой подтверждается нашими кинематическими данными.

4.2.2 Химический состав областей Н II

Для 15 областей Н II была определена электронная температура T_e , электронная плотность n_e , и затем содержание кислорода $12 + \log(O/H)$ и отношение азота к кислороду $\log(N/O)$ с помощью прямого метода (см. главу 1). В исследование вошли Mrk 71 вместе с областью истечения газа, NGC 2363, а также наиболее яркие области на севере галактики (см. расположение областей 1,2 на рис. 4.8 и значения параметров в табл. 10). Для всех этих и ещё шести других областей дополнительно было рассчитано содержание кислорода $12 + \log(O/H)$

с использованием эмпирической калибровки по интенсивным эмиссионным линиям (S-калибровки).

Mrk 71 обладает наиболее сложным спектром среди всех областей галактики, демонстрируя сложную многокомпонентную структуру в линиях $H\alpha$ и $[O\ III]\lambda 5007$. В спектре центральной яркой области узла A (, область 65) выделяется большое количество эмиссионных линий, соответствующих различным степеням ионизации химических элементов H, He, O, S, N, Ne, Cl, Ar, Fe (см. рис. 4.2.2). Для этой области нами было определено содержание кислорода $12 + \log(O/H) = 7.83 \pm 0.01$. Полученное значение согласуется с результатами предыдущих работ: 7.8 в [190], 7.85 в [191] и 7.89 ± 0.1 в [177]. Также отметим, что химическая структура Mrk 71, полученная в рамках данного исследования, является неоднородной и демонстрирует градиент металличности от $12 + \log(O/H) = 7.67$ до 8.02 (см. табл. 10). Совместный анализ интегральных спектров центральной области Mrk 71, выполненный с использованием инструментов Herschel/PACS и Keck/KCWI [177; 192], дал противоречивые результаты относительно наличия температурных вариаций в области Mrk 71. Наше исследование показывает наличие выраженного температурного градиента вдоль щели: от 13500 ± 500 K (область 65C) до $T = 18310 \pm 90$ K (область 65A). Эти оценки также косвенно подтверждают возможность температурных вариаций внутри области 65. Однако качество наших данных (значение качества изображения $\sim 2''$) не позволяет разрешить структуру области 65, анализ которой представлен в вышеуказанных работах. Для более точных выводов необходимы данные с более высоким пространственным разрешением.

Содержание кислорода в области Mrk 71, полученное в настоящей работе, близко к значениям, определённым нами для региона конического истечения газа (соответствующего областям 48, 45, 47). Однако для более удалённых областей галактики значения содержания кислорода оказываются значительно ниже. В частности, область NGC 2363 демонстрирует более низкое содержание кислорода по сравнению с Mrk 71; область 15 также показывает пониженное значение, определённое по эмпирической S-калибровке. Для области 1 результаты противоречивы: метод T_e даёт пониженное значение, в то время как S-калибровка этого не подтверждает. Значения отношения $\log(N/O)$, измеренные методом T_e для 15 областей, не демонстрируют выраженного градиента. Мы не наблюдаем значимых различий в содержании азота относительно кислорода между

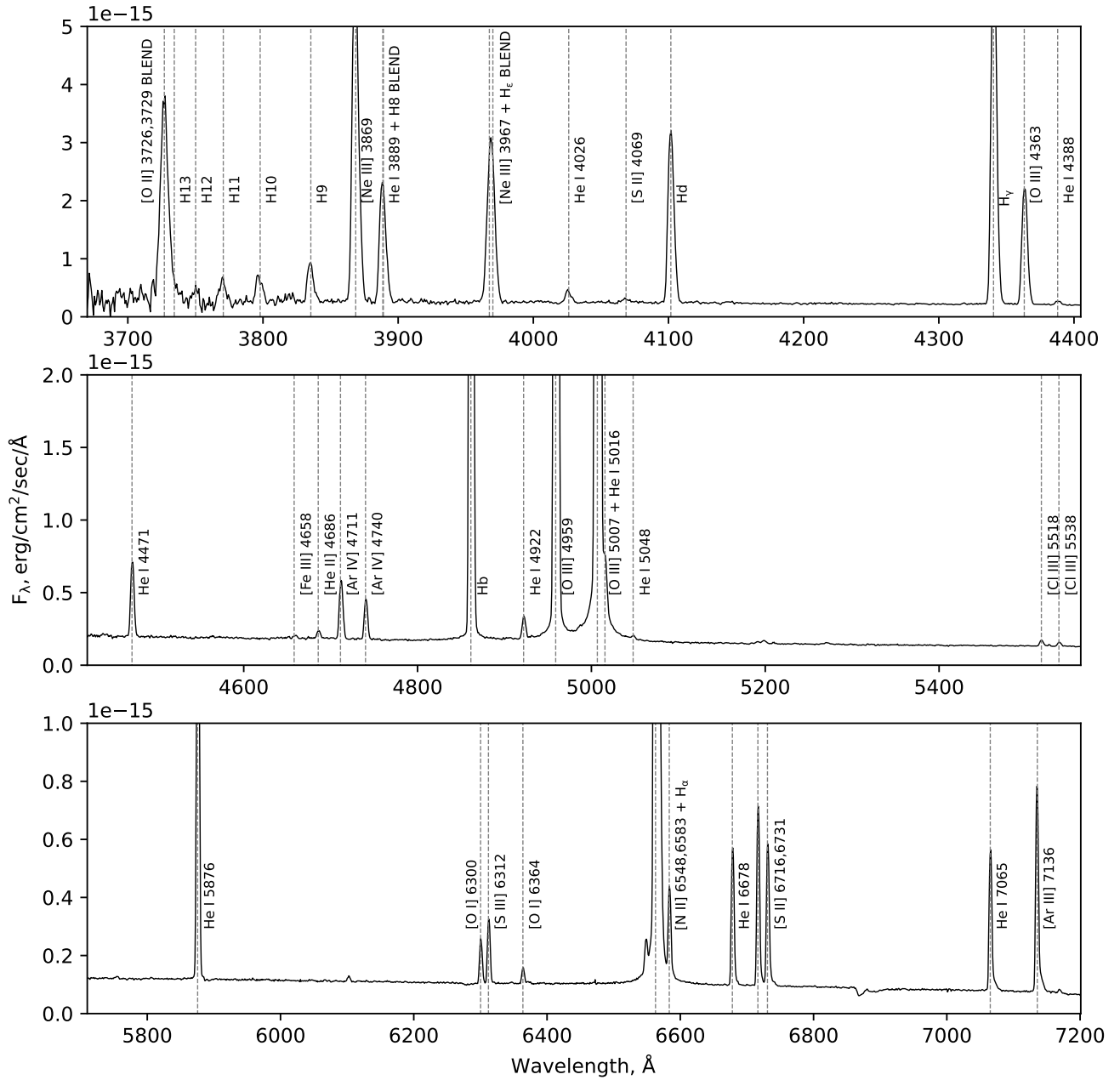


Рисунок 4.11: Спектр области Mrk 71, полученный при помощи длиннощелевой спектроскопии с положением щели $PA=34^\circ$. В спектре наблюдаются эмиссионные линии серии Бальмера, а также линии [O III], [O II], O I, [N II], [S II], , He I, Fe II, , [Ar III] и . Многокомпонентная структура чётко прослеживается в линиях [O III] λ 4959,5007 и H α .

Mrk 71 и остальной частью галактики. Следует отметить, что область 1, имеющая $12 + \log(\text{O}/\text{H}) < 7.6$, демонстрирует большую неопределенность при определении параметров из-за низкого отношения S/N и повышенной дисперсии скоростей (см. область S1 на рис. 4.4), что может указывать на вклад ударных волн (что видно также и на ВРТ-диаграмме) и делает оценки металличности по эмпирической S -калибровке (и, возможно, по методу T_e) ненадёжными. Как обсуждалось ранее, эта область рассматривается как кандидат в WR-звезду.

Таким образом, в нашем исследовании впервые была измерена металличность методом T_e за пределами самой яркой области Mrk 71 галактики NGC 2366. Различие в значении металличности по полю галактики может быть объяснено химическим обогащением межзвёздной среды в окрестностях Mrk 71 в результате выброса вещества. Так как вспышка звездообразования в Mrk 71 продолжается уже несколько миллионов лет и привела к формированию протяженной области истечения вещества на масштабах порядка килопарсека, а также учитывая наличие сверхновых и звёзд типа Вольфа–Райе в галактике, обогащение межзвёздной среды тяжёлыми элементами представляется естественным следствием процессов обратной связи между массивными звездами и МЗС. Подобный эффект был обнаружен, например, в галактике J1044+0353, также демонстрирующей гигантское истечение вещества [193; 194]. Наши результаты подтверждают, что карликовые галактики не всегда можно считать химически однородными (аналогичный вывод был получен в работе [195]); это ставит под сомнение предположение об их мгновенном и равномерном перемешивании, которое часто используется в моделях химической эволюции.

В работе [175] было показано, что градиент металличности в NGC 2366 является плоским и составляет $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.19 \pm 0.14$. Напротив, в работе [173] демонстрируется наличие химической неоднородности в Mrk 71 на масштабах менее 50 пк. Наши результаты согласуются с выводами [173] для области Mrk 71, и, кроме того, мы показываем, что вариации металличности наблюдаются по всей галактике. Полученные данные покрывают недостаточно областей галактики, чтобы измерить радиальный градиент металличности, однако содержание кислорода в NGC 2366 неоднородно и лежит в диапазоне $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.6 - 8.0$.

В работе [196] было показано, что калибровка, опирающаяся на отношение линий $[\text{N II}]/[\text{O III}]$ сильно зависит от параметра ионизации, который изменяет-

ся по всей галактике NGC 2366. Также в работе [197] показали, что при значениях металличности ниже $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \sim 8.2$ метод O3N2 становится слабо чувствительным к её изменениям. Аналогичный эффект ожидается и для калибровки, основанной на соотношении $[\text{N II}]/[\text{O III}]$. Эти эффекты могут объяснить расхождение между нашими результатами и результатами, полученными в работе [175].

4.2.3 Кинематические свойства области Mrk 71 и связанного с ней истечения ионизованного газа

Истечение из области Mrk 71, имеющее коническую форму, было впервые идентифицировано в работе [198] и затем подробно описано в исследованиях [199; 200]. Оно проявляется в виде широких компонентов в спектральных линиях $[\text{O III}]$ и $\text{H}\alpha$, которые были тщательно изучены в ряде предыдущих работ, где предлагались различные физические механизмы, объясняющие форму спектральных линий (см. например [201; 202]). Ниже мы кратко обсуждаем основные особенности, выявленные в наших спектроскопических данных.

Широкая компонента, связанная с истечением газа, остаётся неразрешённой в наших данных ИФП из-за узкого диапазона длин волн вокруг линии $\text{H}\alpha$, что затрудняет его отделение от континуума. Это объясняет в целом низкие значения измеренной дисперсии скоростей в данной области (см. рис. 4.3). В то же время около половины найденных областей с локально повышенной дисперсией скоростей располагается недалеко от границ конуса истечения (см. рис. 4.2с и 4.3); некоторые из них могут быть связаны с воздействием выброса на межзвёздную среду в плотных облатях H II . В полученных нами длиннощелевых спектрах наблюдаются широкие компоненты как в линии $\text{H}\alpha$, так и в линии $[\text{O III}]$ в области Mrk 71. Более того, эти компоненты присутствуют во всех четырёх регионах, относящихся к области Mrk 71 (65–65С), что указывает на наличие истечения на всей протяжённости этих областей. Таким образом, протяжённость широкой компоненты в линиях $\text{H}\alpha$ и $[\text{O III}]$ согласно нашим данным составляет как минимум ~ 530 пк. Наилучшая модель профиля линии $[\text{O III}]$ предполагает наличие двух широких компонент (см. рис. 4.10) с

дисперсиями скоростей $\sim 550 \text{ км с}^{-1}$ и $\sim 2000 \text{ км с}^{-1}$ соответственно (таблица с описанием всех кинематических компонент областей 65-65C представлена в приложении), что сопоставимо с оценкой в 1100 км с^{-1} , полученной в работе [200]. Все эти детали ещё раз подчёркивают сложную кинематическую и в значительной степени неясную структуру области Mrk 71 и указывают на необходимость проведения последующих глубоких спектроскопических наблюдений с помощью интегрально-полевой спектроскопии для всей области.

В данной работе коническое истечение газа было пересечено длиннощелевыми наблюдениями дважды: щель с позиционным углом $PA=87^\circ$ пересекает яркую область у основания конуса (узел А), а щель $PA=32^\circ$ — ионизованные газовые филаменты, расположенные на расстоянии $\sim 2000 \text{ пк}$ от узла А. Газ, пересечённый щелью $PA=32^\circ$, находится на значительном удалении от яркой части конуса и демонстрирует повышенное значение отношения интенсивностей линий $[O \text{ III}]/H\alpha$, что может указывать на недооценку размера области ионизации (см. также карту $[O \text{ III}]/H\beta$ на рис. 4.2).

4.3 Основные выводы главы

На основании данных 3D-спектроскопии в галактике NGC 2366 выделено 20 компактных областей с повышенной дисперсией скоростей в эмиссионной линии $H\alpha$. Большинство из областей демонстрируют многокомпонентные профили, что указывает на механическое воздействие на межзвёздную среду со стороны высокоэнергетичных объектов: остатков сверхновых, звёзд WR/LBV или молодых звёздных скоплений. Две области совпадают с ранее известными кандидатами в остатки сверхновых, ещё три — с известными рентгеновскими источниками.

Мы классифицируем два объекта как новые кандидаты в OCH (S2 и S11). Обнаруженные объекты характеризуются аномальной кинематикой и вкладом в ионизацию механизмов возбуждения, отличных от фотоионизации. Также подтвержден статус ранее известного кандидата в OCH (S3).

В северной части галактики обнаружен ранее не описанный кандидат в звёзду WR: соответствующая область демонстрирует трёхкомпонентный про-

филь линии $H\alpha$, слабое излучение в эмиссионной линии $He\ II\lambda 4686$ и самое высокое в галактике значение электронной температуры ($T_e \approx 22000\text{ K}$).

Для 15 областей $H\ II$ прямым методом (T_e) определено содержание кислорода ($12 + \log(O/H) = 7.6\text{--}8.0$) и содержание азота ($\log(N/O) \approx -1.3$ до -1.6). Для 23 областей оценки содержания кислорода получены с помощью S-калибровки; результаты двух методов хорошо согласуются между собой.

В области Mrk 71 и связанном с ней газовом истечении выявлено повышенное содержание кислорода по сравнению с другими областями $H\ II$ в галактике, что интерпретируется как возможное обогащение межзвёздной среды металлами в результате истечения газа; в этой же области зафиксированы пространственные вариации электронной температуры и содержания кислорода.

Заключение

В результате проведенного детального исследования ионизованного газа в трех близких низкометаллических карликовых галактиках получены следующие результаты:

1. Для пекулярной туманности в галактике NGC 4068 (объект #А) показано, что центральный источник ионизации - одиночный неразрешенный в *HST* объект с эффективной температурой $T_{eff} \sim 40$ kK и болометрической светимостью $L_* \sim (1,5 - 1,7) \times 10^6 L_\odot$.
2. Центральный источник объекта #А окружен туманностью, неразрешенной на полученных изображениях и спектрах. Верхний предел его радиуса оценен как $R < 15$ pc и электронная плотность как $n_e \sim 120$ см⁻³. Туманность расширяется со скоростью $V_{exp} \sim 38$ km s⁻¹, а верхняя граница ее кинематического возраста равна $t \sim 0,5$ Млн лет.
3. Содержание кислорода в объекте #А $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \sim 7,4 - 7,5$ согласуется с металличностью в этой области NGC 4068, относительные содержания Ar/O и Ne/O также соответствуют металличности. При этом в туманности обнаружен сильный переизбыток азота: $\log(\text{N}/\text{O}) = -0,04 \pm 0,27$, что более характерно для солнечной металличности.
4. Наблюдаемые свойства объекта #А позволяют предположить, что это одиночная массивная звезда с низким содержанием металлов, находящаяся на стадии генерации мощного звездного ветра. Туманность, вероятно, представляет собой расширяющийся звездный выброс, движимый звездным ветром. Признаки ее взаимодействия с МЗС обнаруживаются в виде широкой подстилающей компоненты в профиле линии H α вблизи объекта #А.
5. Изменения отношений линий [O III]/H β и [N II]/H α в масштабе 5 лет указывают на вероятную переменность объекта #А.
6. Большинство оболочек в галактике IC 1613 (B1, B3–B7) связаны с OB-ассоциациями. Их ионизация вызвана фотоионизацией УФ-излучением от ближайших O-звезд, как следует из диагностических диаграмм и оценки энергетического баланса в случаях B1, B3 и B7).

7. Природа оболочки В2 остается неоднозначной, поскольку нет звезд, которые могли бы высвободить необходимую УФ-светимость для ее ионизации. Существует источник рентгеновского излучения, проецируемый в центральную область оболочки, однако его также можно интерпретировать как фоновую галактику.
8. Обнаружена новая PN-подобная туманность между оболочками В6 и В7 (соответствует спектру S_8) в галактике IC 1613.
9. Мы отвергаем 5 известных кандидатов WR, опираясь на фотометрию в фильтре He II. Мы дополнительно подтвердили результаты спектроскопией для 4 из них (#2, #3, #4, #5). Кандидаты в звезды WR #2 и #3 демонстрируют сильную эмиссию H α .
10. Проанализированы спектры 32 звезд, демонстрирующих излучение в H α по данным MUSE; две из них демонстрируют профиль PCyg, обе потенциально могут принадлежать к звездному типу LBV.
11. Идентифицировано 20 компактных областей с повышенной дисперсией скоростей в эмиссионной линии H α в галактике NGC 2366. Большинство из объектов демонстрируют многокомпонентные профили. Такая структура эмиссионных линий указывает на механическое воздействие на межзвездную среду со стороны остатков сверхновых, звезд WR/LBV или молодых звездных скоплений, формирующих расширяющиеся оболочки. Две области совпадают с ранее известными кандидатами в остатки сверхновых, ещё три — с известными рентгеновскими источниками.
12. Классифицированы новые кандидаты в остатки сверхновых: объекты S2 и S11, характеризующиеся аномальной кинематикой и вкладом механизмов возбуждения, отличных от фотоионизации. Подтверждён статус ранее известного кандидата S3. Объект S10 классифицирован как остаток сверхновой или кандидат в рентгеновскую двойную систему.
13. Открыт ранее не классифицированный кандидат в звезды WR в северной части галактики NGC 2366. Область демонстрирует трехкомпонентный профиль эмиссионной линии H α и слабое излучение в линии He II λ 4686, а также самое высокое в галактике значение электронной температуры ($T_e \approx 22000$ K).

14. Определено содержание кислорода для 15 областей H II с помощью прямого метода: $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.6\text{--}8.0$, $\log(\text{N}/\text{O}) \approx -1.3$ до -1.6 . Для 23 областей галактики получены оценки содержания кислорода с помощью S-калибровки; оценки, полученные двумя методами, согласуются между собой.
15. Выявлено повышенное содержание кислорода в области Mrk 71 и связанном с ней газовом истечении по сравнению с другими областями H II в галактике NGC 2366, что указывает на возможное обогащение межзвёздной среды металлами, вызванное данным истечением. В Mrk 71 также зафиксированы пространственные вариации T_e и содержания кислорода.

Проведённые исследования демонстрируют, что 3D-спектроскопия с высоким спектральным разрешением представляет собой эффективный инструмент для идентификации массивных звёзд в составе галактик ближней Вселенной. Метод позволяет выявлять данные объекты по пекулярной кинематике, связанной с взаимодействием массивных звезд с МЗС: звездными ветрами, расширяющимися оболочками, остатками сверхновых.

В то же время, узкополосная оптическая фотометрия в специфических линиях (в частности, He II $\lambda 4686$, H α , [O III] $\lambda 5007$, [S II] $\lambda 6716, 6731$) позволяет локализовать области активного звездообразования и оценить морфологические особенности структур, формирующихся под действием излучения и звёздного ветра массивных звезд, а также найти кандидатов в звезды редких эволюционных типов (WR, LBV) и в остатки сверхновых.

Проведенная впоследствии длиннощелевая спектроскопия позволяет уточнить природу объектов, найденных по фотометрии и интерферометрии Фабри-Перро, а также проанализировать межзвездную среду и оценить параметры ионизованного газа, напрямую связанные с деятельностью массивных звезд (металличность, электронную температуру).

Совместное применение наблюдательных методов и спектрального моделирования открывает возможность количественной оценки физических параметров ионизирующего источника. В рамках спектрального моделирования удаётся восстановить такие ключевые характеристики, как начальная масса ионизирующей туманности звезды, стадия её эволюции, эффективная температура и скорость звёздного ветра, что критически важно в случае низкой металличности.

сти исследуемых объектов, так как на данный момент научные представления об эволюции массивных звезд при низкой металличности еще не сформированы.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, Моисееву Алексею Валерьевичу, за помощь, оказанную при постановке задач, получении наблюдений и подготовке публикаций. Автор благодарит Егорова Олега Владимировича за поддержку на всех этапах работы, а также Герасимова Ивана Сергеевича, Васильева Константина Игоревича, и всех своих соавторов. Автор благодарит наблюдателей, получавших данные, использующиеся в работе, а также всех, кто обеспечивал работу телескопов САО РАН и КГО ГАИШ МГУ.

Список литературы

1. *Schinnerer E., Leroy A. K.* Molecular Gas and the Star-Formation Process on Cloud Scales in Nearby Galaxies // . — 2024. — Сент. — Т. 62, № 1. — С. 369—436.
2. The impact of stellar feedback on the density and velocity structure of the interstellar medium / K. Grisdale [и др.] // . — 2017. — Апр. — Т. 466, № 1. — С. 1093—1110.
3. Connecting stellar and galactic scales: Energetic feedback from stellar wind bubbles to supernova remnants / Y. A. Fichtner [и др.] // . — 2024. — Окт. — Т. 690. — A72.
4. *Strömgren B.* The Physical State of Interstellar Hydrogen. // . — 1939. — Май. — Т. 89. — С. 526.
5. Massive stars in extremely metal-poor galaxies: a window into the past / M. Garcia [и др.] // Experimental Astronomy. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 51, № 3. — С. 887—911.
6. Predictions for mass-loss rates and terminal wind velocities of massive O-type stars / L. E. Muijres [и др.] // . — 2012. — ЯНВ. — Т. 537. — A37.
7. *Ali A. A.* The growth of Hii regions around massive stars: the role of metallicity and dust // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2020. — Дек. — Т. 501, № 3. — С. 4136—4147. — URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/staa3992>.
8. Stellar Evolution in the Upper HR Diagram / R. Hirschi [и др.] // Hot and Cool: Bridging Gaps in Massive Star Evolution. Т. 425 / под ред. C. Leitherer [и др.]. — ИЮНЬ 2010. — С. 13. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
9. *Martins F., Palacios A.* A comparison of evolutionary tracks for single Galactic massive stars // . — 2013. — Дек. — Т. 560. — A16.
10. *Gormaz-Matamala A. C., Romagnolo A., Belczynski K.* Evolution of stars with 60 and 200 $M_{\odot}$: predictions for WNh stars in the Milky Way // . — 2025. — Апр. — Т. 696. — A72.

11. Investigating 39 Galactic Wolf-Rayet stars with VLTI/GRAVITY: Uncovering a long-period binary desert / K. Deshmukh [и др.] //. — 2024. — Дек. — Т. 692. — A109.
12. *Maeder A.* The Conti scenario for forming WR stars: past, present and future // *Liege International Astrophysical Colloquia*. Т. 33 / под ред. J. M. Vreux [и др.]. — ЯНВ. 1996. — С. 39. — (*Liege International Astrophysical Colloquia*).
13. *Sander A. A. C., Vink J. S., Hamann W. .-.-R.* Driving classical Wolf-Rayet winds: a Γ - and Z -dependent mass-loss //. — 2020. — ЯНВ. — Т. 491, № 3. — С. 4406—4425.
14. Before the first supernova: combined effects of H II regions and winds on molecular clouds / J. E. Dale [и др.] //. — 2014. — ИЮЛЬ. — Т. 442, № 1. — С. 694—712.
15. *Giuliani A., Cardillo M.* Supernova Remnants in Gamma Rays // *Universe*. — 2024. — Май. — Т. 10, № 5. — С. 203.
16. The supergiant shell with triggered star formation in the dwarf irregular galaxy IC 2574: neutral and ionized gas kinematics / O. V. Egorov [и др.] //. — 2014. — ОКТ. — Т. 444, № 1. — С. 376—391.
17. Complexes of triggered star formation in supergiant shell of Holmberg II / O. V. Egorov [и др.] //. — 2017. — ЯНВ. — Т. 464, № 2. — С. 1833—1853.
18. *Martin C. L., Kobulnicky H. A., Heckman T. M.* The Metal Content of Dwarf Starburst Winds: Results from Chandra Observations of NGC 1569 //. — 2002. — АВГ. — Т. 574, № 2. — С. 663—692.
19. *Shopbell P. L., Bland-Hawthorn J.* The Asymmetric Wind in M82 //. — 1998. — ЯНВ. — Т. 493, № 1. — С. 129—153.
20. *Vink J. S., de Koter A., Lamers H. J. G. L. M.* Mass-loss predictions for O and B stars as a function of metallicity // *A&A*. — 2001. — АПР. — Т. 369. — С. 574—588.
21. New predictions for radiation-driven, steady-state mass-loss and wind-momentum from hot, massive stars. II. A grid of O-type stars in the Galaxy and the Magellanic Clouds / R. Björklund [и др.] //. — 2021. — АПР. — Т. 648. — A36.

22. Low-metallicity massive single stars with rotation. Evolutionary models applicable to I Zwicky 18 / D. Szécsi [и др.] // . — 2015. — Сент. — Т. 581. — A15.
23. *Maeder A., Meynet G.* Stellar evolution with rotation. VII. . Low metallicity models and the blue to red supergiant ratio in the SMC // . — 2001. — Июль. — Т. 373. — С. 555—571.
24. Grids of stellar models with rotation. III. Models from 0.8 to 120 $M_{\odot}$ at a metallicity $Z = 0.002$ / C. Georgy [и др.] // A&A. — 2013. — Окт. — Т. 558. — A103.
25. Stromlo Stellar Tracks: non-solar scaled abundances for massive stars / K. Grasha [и др.] // arXiv e-prints. — 2021. — Янв. — arXiv:2101.01197.
26. Low-metallicity massive single stars with rotation. Evolutionary models applicable to I Zwicky 18 / D. Szécsi [и др.] // A&A. — 2015. — Сент. — Т. 581. — A15.
27. Grids of stellar models with rotation. IV. Models from 1.7 to 120 $M_{\odot}$ at a metallicity $Z = 0.0004$ / J. H. Groh [и др.] // . — 2019. — Июль. — Т. 627. — A24.
28. The homogeneity of chemical abundances in H II regions of the Magellanic Clouds / G. Dominguez-Guzmán [и др.] // . — 2022. — Дек. — Т. 517, № 3. — С. 4497—4514.
29. *Larkin M. M., Gerasimov R., Burgasser A. J.* Characterization of Population III Stars with Stellar Atmosphere and Evolutionary Modeling and Predictions of their Observability with the JWST // . — 2023. — Янв. — Т. 165, № 1. — С. 2.
30. *Latif M. A., Whalen D., Khochfar S.* The Birth Mass Function of Population III Stars // . — 2022. — Янв. — Т. 925, № 1. — С. 28.
31. *Norman M. L.* Population III Star Formation and IMF // First Stars III. Т. 990 / под ред. B. W. O'Shea, A. Heger. — AIP, март 2008. — С. 3—15. — (American Institute of Physics Conference Series).
32. Detecting Population III Stars through Tidal Disruption Events in the Era of JWST and Roman / R. Kar Chowdhury [и др.] // . — 2024. — Май. — Т. 966, № 2. — С. L33.

33. Very massive stars at low metallicity: Evolution, synthetic spectroscopy, and impact on the integrated light of starbursts / F. Martins [и др.] //. — 2025. — ИЮНЬ. — Т. 698. — A262.
34. *Richardson N. D., Mehner A.* The 2018 Census of Luminous Blue Variables in the Local Group // Research Notes of the American Astronomical Society. — 2018. — ИЮЛЬ. — Т. 2, № 3. — С. 121.
35. Search for new Galactic Wolf-Rayet stars using Gaia DR3: I. Candidate selection and the follow-up of the bright sample / L. Mulato [и др.] //. — 2025. — Март. — Т. 695. — A227.
36. *Shenar T.* Wolf-Rayet stars // arXiv e-prints. — 2024. — ОКТ. — arXiv:2410.04436.
37. *Neugent K. F., Massey P., Morrell N.* A Modern Search for Wolf-Rayet Stars in the Magellanic Clouds. IV. A Final Census //. — 2018. — АВГ. — Т. 863, № 2. — С. 181.
38. An absence of binary companions to Wolf-Rayet stars in the Small Magellanic Cloud: Implications for mass loss and black hole masses at low metallicities / A. Schootemeijer [и др.] //. — 2024. — СЕНТ. — Т. 689. — A157.
39. The R136 star cluster dissected with Hubble Space Telescope/STIS - II. Physical properties of the most massive stars in R136 / J. M. Bestenlehner [и др.] //. — 2020. — ДЕК. — Т. 499, № 2. — С. 1918—1936.
40. The origin of very massive stars around NGC 3603 / V. M. Kalari [и др.] //. — 2019. — МАЙ. — Т. 625. — С. L2.
41. The most massive stars in the Arches cluster / F. Martins [и др.] //. — 2008. — ЯНВ. — Т. 478, № 1. — С. 219—233.
42. *Kozyreva A., Yoon S. .-.-C., Langer N.* Explosion and nucleosynthesis of low-redshift pair-instability supernovae //. — 2014. — ИЮНЬ. — Т. 566. — A146.
43. *Neugent K., Massey P.* The Wolf-Rayet Content of the Galaxies of the Local Group and Beyond // Galaxies. — 2019. — АВГ. — Т. 7, № 3. — С. 74.
44. *Weis K., Bomans D. J.* Luminous Blue Variables // Galaxies. — 2020. — ФЕВР. — Т. 8, № 1. — С. 20.

45. *Brinks E., Walter F.* The Violent Interstellar Medium in Dwarf Galaxies: Atomic Gas // *Magellanic Clouds and Other Dwarf Galaxies* / под ред. Т. Richtler, J. M. Braun. — Дек. 1998. — С. 1—10.
46. The Galactic Distribution of Large H I Shells / N. M. McClure-Griffiths [и др.] //. — 2002. — Окт. — Т. 578, № 1. — С. 176—193.
47. *Lozinskaya T. A.* The interaction of a stellar wind with the ISM: The interstellar environments of WR stars // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. — 1996. — Янв. — Т. 11, № 3. — С. 307—315.
48. Interstellar Medium Surrounding the WO Star in the Galaxy IC 1613: New Optical and Radio Observations / Т. А. Lozinskaya [и др.] // *Astronomy Reports*. — 2001. — Июнь. — Т. 45, № 6. — С. 417—427.
49. *Peeples M. S., Pogge R. W., Stanek K. Z.* Outliers from the Mass-Metallicity Relation. I. A Sample of Metal-Rich Dwarf Galaxies from SDSS //. — 2008. — Окт. — Т. 685, № 2. — С. 904—914.
50. Chemical abundances and radial velocities in the extremely metal-poor galaxy DDO 68 / F. Annibali [и др.] //. — 2019. — Янв. — Т. 482, № 3. — С. 3892—3914.
51. Spatially resolved integral field spectroscopy of the ionized gas in IZw18 / C. Kehrig [и др.] //. — 2016. — Июль. — Т. 459, № 3. — С. 2992—3004.
52. Galaxy Zoo Green Peas: discovery of a class of compact extremely star-forming galaxies / C. Cardamone [и др.] //. — 2009. — Ноябрь. — Т. 399, № 3. — С. 1191—1205.
53. *Izotov Y. I., Guseva N. G., Thuan T. X.* Green Pea Galaxies and Cohorts: Luminous Compact Emission-line Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey //. — 2011. — Февр. — Т. 728, № 2. — С. 161.
54. *Jaskot A. E., Oey M. S.* The Origin and Optical Depth of Ionizing Radiation in the “Green Pea” Galaxies //. — 2013. — Апр. — Т. 766, № 2. — С. 91.
55. Mrk 71/NGC 2366: The Nearest Green Pea Analog / G. Micheva [и др.] //. — 2017. — Авг. — Т. 845, № 2. — С. 165.
56. *Moiseev A. V.* Scanning Fabry–Perot Interferometer of the 6-m SAO RAS Telescope // *Astrophysical Bulletin*. — 2021. — Июль. — Т. 76, № 3. — С. 316—339.

57. Transient Double-Beam Spectrograph for the 2.5-m Telescope of the Caucasus Mountain Observatory of SAI MSU / S. A. Potanin [и др.] // *Astronomy Letters*. — 2020. — Дек. — Т. 46, № 12. — С. 836—854.
58. *Afanasiev V. L., Moiseev A. V.* The SCORPIO Universal Focal Reducer of the 6-m Telescope // *Astronomy Letters*. — 2005. — Март. — Т. 31. — С. 194—204.
59. *Moiseev A., Perepelitsyn A., Oparin D.* Mapper of Narrow Galaxy Lines (MaNGaL): new tunable filter imager for Caucasian telescopes // *Experimental Astronomy*. — 2020. — Сент. — Т. 50, № 2—3. — С. 199—214.
60. *Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R.* Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects // *PASP*. — 1981. — Февр. — Т. 93. — С. 5—19.
61. Theoretical Modeling of Starburst Galaxies / L. J. Kewley [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2001. — Июль. — Т. 556. — С. 121—140.
62. The host galaxies of active galactic nuclei / G. Kauffmann [и др.] // *MNRAS*. — 2003. — Дек. — Т. 346. — С. 1055—1077.
63. BOND: Bayesian Oxygen and Nitrogen abundance Determinations in giant H II regions using strong and semistrong lines / N. Vale Asari [и др.] // *MNRAS*. — 2016. — Авг. — Т. 460, № 2. — С. 1739—1757.
64. Planck 2013 results. XI. All-sky model of thermal dust emission / Planck Collaboration [и др.] // *A&A*. — 2014. — Нояб. — Т. 571. — A11.
65. *Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S.* The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction // *The Astrophysical Journal*. — 1989. — Окт. — Т. 345. — С. 245—256.
66. *Fitzpatrick E. L.* Correcting for the Effects of Interstellar Extinction // *PASP*. — 1999. — Янв. — Т. 111. — С. 63—75.
67. *Moiseev A. V., Lozinskaya T. A.* Ionized gas velocity dispersion in nearby dwarf galaxies: looking at supersonic turbulent motions // *MNRAS*. — 2012. — Июнь. — Т. 423, № 2. — С. 1831—1844.

68. *Dinerstein H. L.* Abundances in extragalactic H II regions // The Interstellar Medium in Galaxies. Т. 161 / под ред. J. Thronson Harley A., J. M. Shull. — ЯНВ. 1990. — С. 257—285. — (Astrophysics and Space Science Library).
69. *Pilyugin L. S., Grebel E. K.* New calibrations for abundance determinations in H II regions // MNRAS. — 2016. — Апр. — Т. 457. — С. 3678—3692.
70. On the composition of H II regions in southern galaxies - I. NGC 300 and 1365. / B. E. J. Pagel [и др.] // MNRAS. — 1979. — Окт. — Т. 189. — С. 95—113.
71. *Alloin D., Collin-Souffrin S., Joly M.* Line intensity data compilation for a sample of H II regions. // AAPS. — 1979. — Авг. — Т. 37. — С. 361—366.
72. *Luridiana V., Morisset C., Shaw R. A.* PyNeb: a new tool for analyzing emission lines. I. Code description and validation of results //. — 2015. — ЯНВ. — Т. 573. — A42.
73. The chemical composition of metal-poor emission-line galaxies in the Data Release 3 of the Sloan Digital Sky Survey / Y. I. Izotov [и др.] // A&A. — 2006. — Март. — Т. 448, № 3. — С. 955—970.
74. *Garnett D. R.* Electron Temperature Variations and the Measurement of Nebular Abundances //. — 1992. — Апр. — Т. 103. — С. 1330.
75. CLOUDY 90: Numerical Simulation of Plasmas and Their Spectra / G. J. Ferland [и др.] // PASP. — 1998. — ИЮЛЬ. — Т. 110, № 749. — С. 761—778.
76. The 2017 Release Cloudy / G. J. Ferland [и др.] // rmxaa. — 2017. — Окт. — Т. 53. — С. 385—438.
77. *Morisset C.* pyCloudy: Tools to manage astronomical Cloudy photoionization code. — Апр. 2013.
78. *Hillier D. J., Miller D. L.* The Treatment of Non-LTE Line Blanketing in Spherically Expanding Outflows // The Astrophysical Journal. — 1998. — Март. — Т. 496. — С. 407—427.
79. *Martins F., Schaerer D., Hillier D. J.* A new calibration of stellar parameters of Galactic O stars // A&A. — 2005. — ИЮНЬ. — Т. 436, № 3. — С. 1049—1065.

80. *Osterbrock D. E., Ferland G. J.* Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei. — 2006.
81. *Green G.* dustmaps: A Python interface for maps of interstellar dust // The Journal of Open Source Software. — 2018. — ИЮНЬ. — Т. 3, № 26. — С. 695.
82. *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. — АВГ. — Т. 20. — С. 363–370.
83. SCORPIO-2 guiding and calibration system in the prime focus of the 6-m telescope / V. L. Afanasiev [и др.] // Astrophysical Bulletin. — 2017. — ОКТ. — Т. 72, № 4. — С. 458–468.
84. Star formation complexes in the ‘galaxy-sized’ supergiant shell of the galaxy HolmbergI / O. V. Egorov [и др.] // MNRAS. — 2018. — АВГ. — Т. 478, № 3. — С. 3386–3409.
85. 3D spectrography at high spatial resolution. I. Concept and realization of the integral field spectrograph TIGER. / R. Bacon [и др.] // AAPS. — 1995. — ОКТ. — Т. 113. — С. 347.
86. *García-Lorenzo B., Arribas S., Mediavilla E.* INTEGRAL: A Simple and Friendly Integral Field Unit Available at the WHT // The Newsletter of the Isaac Newton Group of Telescopes. — 2000. — СЕНТ. — Т. 3. — С. 25–28.
87. SINFONI - Integral field spectroscopy at 50 milli-arcsecond resolution with the ESO VLT / F. Eisenhauer [и др.] // Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes. Т. 4841 / под ред. M. Iye, A. F. M. Moorwood. — Март 2003. — С. 1548–1561. — (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series).
88. The MUSE second-generation VLT instrument / R. Bacon [и др.] // Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III. Т. 7735 / под ред. I. S. McLean, S. K. Ramsay, H. Takami. — ИЮЛЬ 2010. — С. 773508. — (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series).
89. *Moiseev A. V.* Scanning Fabry-Perot Interferometer of the 6-m SAO RAS Telescope // Astrophysical Bulletin. — 2021. — ИЮЛЬ. — Т. 76, № 3. — С. 316–339.

90. *Moiseev A. V., Egorov O. V.* Reduction of CCD observations made with the Fabry-Perot scanning interferometer. II. Additional procedures // *Astrophysical Bulletin*. — 2008. — ИЮНЬ. — Т. 63. — С. 181–192.
91. *Kewley L. J., Nicholls D. C., Sutherland R. S.* Understanding Galaxy Evolution Through Emission Lines //. — 2019. — АВГ. — Т. 57. — С. 511–570.
92. Photometric properties of the Local Volume dwarf galaxies / M. E. Sharina [и др.] // *MNRAS*. — 2008. — Март. — Т. 384, № 4. — С. 1544–1562.
93. The Caucasian Mountain Observatory of the Sternberg Astronomical Institute: First Six Years of Operation / N. Shatsky [и др.] // *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century* / под ред. I. I. Romanyuk [и др.]. — Дек. 2020. — С. 127–132.
94. *Lozinskaya T. A., Moiseev A. V., Podorvanyuk N. Y.* Detailed Kinematic Study of the Ionized and Neutral Gas in the Complex of Star Formation in the Galaxy IC 1613 // *Astronomy Letters*. — 2003. — Февр. — Т. 29. — С. 77–90.
95. XMM-Newton observatory. I. The spacecraft and operations / F. Jansen [и др.] // *A&A*. — 2001. — ЯНВ. — Т. 365. — С. L1–L6.
96. The Swift Gamma-Ray Burst Mission / N. Gehrels [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2004. — АВГ. — Т. 611, № 2. — С. 1005–1020.
97. The Swift X-Ray Telescope / D. N. Burrows [и др.] // *ssr*. — 2005. — Окт. — Т. 120, № 3–4. — С. 165–195.
98. Stellar feedback impact on the ionized gas kinematics in the dwarf galaxy Sextans A / I. S. Gerasimov [и др.] // *MNRAS*. — 2022. — Дек. — Т. 517, № 4. — С. 4968–4985.
99. *Egorov O. V., Lozinskaya T. A., Moiseev A. V.* A region of violent star formation in the Irr galaxy IC 10: Structure and kinematics of ionized and neutral gas // *Astronomy Reports*. — 2010. — Апр. — Т. 54, № 4. — С. 277–294.
100. The young stellar population of IC 1613. I. A new catalogue of OB associations / M. Garcia [и др.] // *A&A*. — 2009. — АВГ. — Т. 502, № 3. — С. 1015–1041.

101. *Makarov D. I., Makarova L. N., Uklein R. I.* Distances to dwarf galaxies of the Canes Venatici I cloud // *Astrophysical Bulletin*. — 2013. — Апр. — Т. 68. — С. 125—138.
102. Observational database for studies of nearby universe / E. I. Kaisina [и др.] // *Astrophysical Bulletin*. — 2012. — ЯНВ. — Т. 67. — С. 115—122.
103. Direct Oxygen Abundances for Low-luminosity LVL Galaxies / D. A. Berg [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2012. — АВГ. — Т. 754. — С. 98.
104. *Smirnov-Pinchukov G. V., Egorov O. V.* Measurements of the Expansion Velocities of Ionized-Gas Superbubbles in Nearby Galaxies Based on Integral Field Spectroscopy Data // *Astrophysical Bulletin*. — 2021. — ОКТ. — Т. 76, № 4. — С. 367—380.
105. Interstellar bubbles. II. Structure and evolution. / R. Weaver [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 1977. — Дек. — Т. 218. — С. 377—395.
106. *Izotov Y., Thuan T. X.* Heavy Element Abundances in the Most Metal-Deficient Dwarf Galaxies // *Chemical Evolution from Zero to High Redshift* / под ред. J. R. Walsh, M. R. Rosa. — ЯНВ. 1999. — С. 149.
107. *López-Sánchez Á. R., Esteban C.* Massive star formation in Wolf-Rayet galaxies. IV. Colours, chemical-composition analysis and metallicity-luminosity relations // *A&A*. — 2010. — Июль. — Т. 517. — A85.
108. *Schlafly E. F., Finkbeiner D. P.* Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD // *The Astrophysical Journal*. — 2011. — АВГ. — Т. 737, № 2. — С. 103.
109. The evolution of stellar structures in dwarf galaxies / N. Bastian [и др.] // *MNRAS*. — 2011. — Март. — Т. 412, № 3. — С. 1539—1551.
110. The Photometric Performance and Calibration of the Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys / M. Sirianni [и др.] // *PASP*. — 2005. — ОКТ. — Т. 117, № 836. — С. 1049—1112.
111. *Martins F., Plez B.* UBVJHK synthetic photometry of Galactic O stars // *A&A*. — 2006. — ОКТ. — Т. 457, № 2. — С. 637—644.
112. *Calzetti D.* The Dust Opacity of Star-forming Galaxies // *PASP*. — 2001. — Дек. — Т. 113, № 790. — С. 1449—1485.

113. Spectrophotometry of Sextans A and B: Chemical Abundances of H II Regions and Planetary Nebulae / A. Y. Kniazev [и др.] // The Astronomical Journal. — 2005. — Окт. — Т. 130, № 4. — С. 1558—1573.
114. Planetary Nebulae as Standard Candles. XII. Connecting the Population I and Population II Distance Scales / R. Ciardullo [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2002. — Сент. — Т. 577, № 1. — С. 31—50.
115. Planetary nebula luminosity function distances for 19 galaxies observed by PHANGS-MUSE / F. Scheuermann [и др.] // MNRAS. — 2022. — Апр. — Т. 511, № 4. — С. 6087—6109.
116. Planetary nebulae with Wolf-Rayet-type central stars - III. A detailed view of NGC 6905 and its central star / V. M. A. Gómez-González [и др.] // MNRAS. — 2022. — Янв. — Т. 509, № 1. — С. 974—989.
117. The evolution of massive stars and their spectra. I. A non-rotating $60 M_{\odot}$ star from the zero-age main sequence to the pre-supernova stage / J. H. Groh [и др.] // A&A. — 2014. — Апр. — Т. 564. — A30.
118. *Kudritzki R.-P., Puls J.* Winds from Hot Stars // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 2000. — Янв. — Т. 38. — С. 613—666.
119. *Vink J. S., de Koter A., Lamers H. J. G. L. M.* New theoretical mass-loss rates of O and B stars // A&A. — 2000. — Окт. — Т. 362. — С. 295—309.
120. Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA) / B. Paxton [и др.] // The Astrophysical Journals. — 2011. — Янв. — Т. 192, № 1. — С. 3.
121. Low-metallicity massive single stars with rotation. II. Predicting spectra and spectral classes of chemically homogeneously evolving stars / B. Kubátová [и др.] // A&A. — 2019. — Март. — Т. 623. — A8.
122. *Stock D. J., Barlow M. J.* A search for ejecta nebulae around Wolf-Rayet stars using the SHS H α survey // MNRAS. — 2010. — Дек. — Т. 409, № 4. — С. 1429—1440.
123. *Krtićka J., Kubát J.* Comoving frame models of hot star winds. II. Reduction of O star wind mass-loss rates in global models // A&A. — 2017. — Окт. — Т. 606. — A31.

124. New predictions for radiation-driven, steady-state mass-loss and wind-momentum from hot, massive stars. II. A grid of O-type stars in the Galaxy and the Magellanic Clouds / R. Björklund [и др.] // A&A. — 2021. — Апр. — Т. 648. — A36.
125. *Conti P. S.* On the relationship between Of and WR stars. // Memoires of the Societe Royale des Sciences de Liege. — 1975. — ЯНВ. — Т. 9. — С. 193—212.
126. *Conti P. S.* Basic Observational Constraints on the Evolution of Massive Stars // Observational Tests of the Stellar Evolution Theory. Т. 105 / под ред. A. Maeder, A. Renzini. — 1984. — С. 233. — (IAU Symposium).
127. *Paczynski B.* Evolution of Close Binaries. V. The Evolution of Massive Binaries and the Formation of the Wolf-Rayet Stars // actaa. — 1967. — ЯНВ. — Т. 17. — С. 355.
128. *Vink J. S., de Koter A., Lamers H. J. G. L. M.* Mass-loss predictions for O and B stars as a function of metallicity // A&A. — 2001. — Апр. — Т. 369. — С. 574—588.
129. Are Wolf-Rayet Stars Able to Pollute the Interstellar Medium of Galaxies? Results from Integral Field Spectroscopy / E. Pérez-Montero [и др.] // Advances in Astronomy. — 2013. — ЯНВ. — Т. 2013. — С. 837392.
130. *Stock D. J., Barlow M. J., Wesson R.* The spectroscopic properties of the nebulae around seven Galactic and LMC Wolf-Rayet stars // MNRAS. — 2011. — Дек. — Т. 418, № 4. — С. 2532—2547.
131. The chemical composition of Galactic ring nebulae around massive stars / C. Esteban [и др.] // MNRAS. — 2016. — АВГ. — Т. 460, № 4. — С. 4038—4062.
132. Ionization structure and chemical abundances of the Wolf-Rayet nebula NGC 6888 with integral field spectroscopy / A. Fernández-Martín [и др.] // A&A. — 2012. — Май. — Т. 541. — A119.
133. The blue supergiant Sher 25 and its intriguing hourglass nebula / M. A. Hendry [и др.] // MNRAS. — 2008. — АВГ. — Т. 388, № 3. — С. 1127—1142.
134. The blue supergiant MN18 and its bipolar circumstellar nebula / V. V. Gvaramadze [и др.] // MNRAS. — 2015. — Нояб. — Т. 454, № 1. — С. 219—237.

135. Optical spectroscopy of the blue supergiant Sk-69° 279 and its circumstellar shell with SALT / V. V. Gvaramadze [и др.] // MNRAS. — 2018. — Февр. — Т. 474, № 1. — С. 1412—1425.
136. *Crowther P. A.* Physical Properties of Wolf-Rayet Stars // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 2007. — Сент. — Т. 45, № 1. — С. 177—219.
137. 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 [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2009. — Июнь. — Т. 698. — С. 1698—1720.
138. The History Goes On: Century Long Study of Romano’s Star / O. Maryeva [и др.] // Galaxies. — 2019. — Сент. — Т. 7, № 3. — С. 79.
139. Physical Parameters of Erupting Luminous Blue Variables: NGC 2363-V1 Caught in the Act / L. Drissen [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2001. — Янв. — Т. 546, № 1. — С. 484—495.
140. *Petit V., Drissen L., Crowther P. A.* Spectral Evolution of the Luminous Blue Variable NGC 2363-V1. I. Observations and Qualitative Analysis of the Ongoing Giant Eruption // The Astronomical Journal. — 2006. — Нояб. — Т. 132, № 5. — С. 1756—1762.
141. *Armandroff T. E., Massey P.* Wolf-Rayet stars in NGC 6822 and IC 1613. // The Astrophysical Journal. — 1985. — Апр. — Т. 291. — С. 685—692.
142. Little Things / D. A. Hunter [и др.] // The Astronomical Journal. — 2012. — Нояб. — Т. 144, № 5. — С. 134.
143. *Lee H., Grebel E. K., Hodge P. W.* Nebular abundances of nearby southern dwarf galaxies // A&A. — 2003. — Апр. — Т. 401. — С. 141—159.
144. The Nearby Dwarf Irregular Galaxy IC 1613 and Its Complex Bubble Region: Chandra and VLA Observations / E. M. Schlegel [и др.] // The Astronomical Journal. — 2022. — Февр. — Т. 163, № 2. — С. 66.
145. The XMM-Newton serendipitous survey. IX. The fourth XMM-Newton serendipitous source catalogue / N. A. Webb [и др.] // A&A. — 2020. — Сент. — Т. 641. — A136.

146. 2SXPS: An Improved and Expanded Swift X-Ray Telescope Point-source Catalog / P. A. Evans [и др.] // The Astrophysical Journals. — 2020. — Апр. — Т. 247, № 2. — С. 54.
147. XMMU J050722.1-684758: discovery of a new Be X-ray binary pulsar likely associated with the supernova remnant MCSNR J0507-6847 / C. Maitra [и др.] // MNRAS. — 2021. — ИЮНЬ. — Т. 504, № 1. — С. 326—337.
148. *Davidson K., Kinman T. D.* Data on an unusual Wolf-Rayet star in the nearby Galaxy IC 1613 // PASP. — 1982. — АВГ. — Т. 94. — С. 634—639.
149. He II Emission in Extragalactic H II Regions / D. R. Garnett [и др.] // The Astrophysical Journal. — 1991. — ИЮНЬ. — Т. 373. — С. 458.
150. *Armandroff T. E., Massey P.* Wolf-Rayet Stars in Local Group Galaxies: Numbers and Spectral Properties // The Astronomical Journal. — 1991. — СЕНТ. — Т. 102. — С. 927.
151. Resolving the Source of X-Rays in the Local Group Dwarf IC 1613: X-Ray, Radio, and Optical Observations of a Luminous Supernova Remnant / T. A. Lozinskaya [и др.] // The Astronomical Journal. — 1998. — НОЯБ. — Т. 116, № 5. — С. 2328—2340.
152. *Massey P., Conti P. S.* Wolf-rayet stars in M 33. //. — 1983. — ОКТ. — Т. 273. — С. 576—589.
153. *Massey P., Johnson O.* Evolved Massive Stars in the Local Group. II. A New Survey for Wolf-Rayet Stars in M33 and Its Implications for Massive Star Evolution: Evidence of the “Conti Scenario” in Action //. — 1998. — ОКТ. — Т. 505, № 2. — С. 793—827.
154. *Bibby J. L., Crowther P. A.* A Very Large Telescope imaging and spectroscopic survey of the Wolf-Rayet population in NGC7793 //. — 2010. — ИЮЛЬ. — Т. 405, № 4. — С. 2737—2753.
155. Overview of the DESI Legacy Imaging Surveys / A. Dey [и др.] // The Astronomical Journal. — 2019. — МАЙ. — Т. 157, № 5. — С. 168.
156. *Fitzpatrick E. L.* Correcting for the Effects of Interstellar Extinction // PASP. — 1999. — ЯНВ. — Т. 111, № 755. — С. 63—75.

157. *Tsybal V., Ryabchikova T., Sitnova T.* Software for NLTE Spectrum Fitting // Physics of Magnetic Stars. Т. 518 / под ред. D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin. — Июль 2019. — С. 247—252. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
158. *Castelli F., Kurucz R. L.* New Grids of ATLAS9 Model Atmospheres // Modelling of Stellar Atmospheres. Т. 210 / под ред. N. Piskunov, W. W. Weiss, D. F. Gray. — Янв. 2003. — А20. — (Symposium of the International Astronomical Union).
159. VLT Spectroscopy of Blue Supergiants in IC 1613 / F. Bresolin [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2007. — Дек. — Т. 671, № 2. — С. 2028—2039.
160. *Menzies J. W., Whitelock P. A., Feast M. W.* The Local Group Galaxy IC 1613 and its asymptotic giant branch variables // MNRAS. — 2015. — Сент. — Т. 452, № 1. — С. 910—923.
161. *Gaia Collaboration* VizieR Online Data Catalog: Gaia EDR3 (Gaia Collaboration, 2020) // VizieR Online Data Catalog. — 2020. — Нояб. — С. I/350.
162. The SIMBAD astronomical database. The CDS reference database for astronomical objects / M. Wenger [и др.] // A&As. — 2000. — Апр. — Т. 143. — С. 9—22.
163. 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 / R. M. Humphreys [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2017. — Февр. — Т. 836, № 1. — С. 64.
164. Luminous blue variable candidates in M31 / A. Sarkisyan [и др.] // MNRAS. — 2020. — Сент. — Т. 497, № 1. — С. 687—697.
165. *Romano G.* A new variable star in M33. // A&A. — 1978. — Июль. — Т. 67. — С. 291.
166. Spectral variability of LBV star V 532 (Romano's star) / O. N. Sholukhova [и др.] // Astrophysical Bulletin. — 2011. — Апр. — Т. 66, № 2. — С. 123—143.

167. *Valeev A., Fabrika S., Sholukhova O.* Spectrum of Var C in M33 in its maximum light // The Astronomer's Telegram. — 2013. — Ноябрь. — Т. 5538. — С. 1.
168. Var C: Long-term photometric and spectral variability of a luminous blue variable in M 33 / B. Burggraf [и др.] // A&A. — 2015. — Сентябрь. — Т. 581. — A12.
169. New luminous blue variables in the Andromeda galaxy / O. Sholukhova [и др.] // MNRAS. — 2015. — Март. — Т. 447, № 3. — С. 2459—2467.
170. Overview of the DESI Legacy Imaging Surveys / A. Dey [и др.] //. — 2019. — Май. — Т. 157, № 5. — С. 168.
171. *Hunter D. A., Elmegreen B. G., Ludka B. C.* Galex Ultraviolet Imaging of Dwarf Galaxies and Star Formation Rates // The Astronomical Journal. — 2010. — Февр. — Т. 139. — С. 447—475.
172. Little Things / D. A. Hunter [и др.] // The Astronomical Journal. — 2012. — Ноябрь. — Т. 144, № 5. — С. 134.
173. Resolving Ionization and Metallicity on Parsec Scales across Mrk 71 with HST-WFC3 / B. L. James [и др.] //. — 2016. — Янв. — Т. 816, № 1. — С. 40.
174. Optical Observations of the Nearby Galaxy NGC 2366 Through Narrowband H_α and [SII] Filters. Supernova Remnants Status / M. M. Vučetić [и др.] // Serbian Astronomical Journal. — 2019. — Июнь. — Т. 198. — С. 13—23.
175. The O/H Distribution in the Low-Mass Galaxies NGC 2366 and NGC 4395 / J.-R. Roy [и др.] //. — 1996. — Март. — Т. 460. — С. 284.
176. Quantifying the energy balance between the turbulent ionised gas and young stars / O. V. Egorov [и др.] //. — 2023. — Октябрь. — Т. 678. — A153.
177. Accurate oxygen abundance of interstellar gas in Mrk 71 from optical and infrared spectra / Y. Chen [и др.] // Nature Astronomy. — 2023. — Июль. — Т. 7. — С. 771—778.
178. The chemical composition of metal-poor emission-line galaxies in the Data Release 3 of the Sloan Digital Sky Survey / Y. I. Izotov [и др.] //. — 2006. — Март. — Т. 448, № 3. — С. 955—970.

179. Star formation in the nearby dwarf galaxy DDO 53: interplay between gas accretion and stellar feedback / O. V. Egorov [и др.] // MNRAS. — 2021. — Дек. — Т. 508, № 2. — С. 2650—2667.
180. Stellar feedback impact on the ionized gas kinematics in the dwarf galaxy Sextans A / I. S. Gerasimov [и др.] //. — 2022. — Дек. — Т. 517, № 4. — С. 4968—4985.
181. Stellar feedback impact on the ionized gas kinematics in the dwarf galaxy Sextans B / I. S. Gerasimov [и др.] //. — 2024. — Апр. — Т. 529, № 2. — С. 1138—1153.
182. *Gutkin J., Charlot S., Bruzual G.* Modelling the nebular emission from primeval to present-day star-forming galaxies // MNRAS. — 2016. — Окт. — Т. 462, № 2. — С. 1757—1774.
183. *Chomiuk L., Wilcots E. M.* A Search for Radio Supernova Remnants in Four Irregular Galaxies //. — 2009. — Апр. — Т. 137, № 4. — С. 3869—3883.
184. *Ercan E. N., Aktekin E.* NGC 2366 : An optical search for possible supernova remnants //. — 2021. — Февр. — Т. 83. — С. 101492.
185. *Thuan T. X., Bauer F. E., Izotov Y. I.* The X-ray properties of the cometary blue compact dwarf galaxies Mrk 59 and Mrk 71 //. — 2014. — Июнь. — Т. 441, № 2. — С. 1841—1853.
186. *Kaaret P., Prestwich A.* X-Rays from the Nearby Compact Emission-line Galaxy NGC 2366 //. — 2024. — Июнь. — Т. 968, № 1. — С. 36.
187. Violent Star Formation in NGC 2363 / R. M. Gonzalez-Delgado [и др.] //. — 1994. — Дек. — Т. 437. — С. 239.
188. The Star Formation History of the Starburst Region NGC 2363 and its Surroundings / L. Drissen [и др.] //. — 2000. — Февр. — Т. 119, № 2. — С. 688—704.
189. *Drissen L., Roy J.-R., Robert C.* A New Luminous Blue Variable in the Giant Extragalactic H II Region NGC 2363 //. — 1997. — Янв. — Т. 474, № 1. — С. L35—L38.
190. The cometary blue compact dwarf galaxies Mkn 59 and Mkn 71. A clue to dwarf galaxy evolution? / K. G. Noeske [и др.] //. — 2000. — Сент. — Т. 361. — С. 33—52.

191. *Izotov Y. I., Thuan T. X.* Near-infrared Spectroscopy of Five Blue Compact Dwarf Galaxies: II Zw 40, Mrk 71, Mrk 930, Mrk 996, and SBS 0335-052E //. — 2011. — ИЮНЬ. — Т. 734, № 2. — С. 82.
192. Effects of density and temperature variations on the metallicity of Mrk 71 / J. E. Méndez-Delgado [и др.] // Nature Astronomy. — 2024. — Март. — Т. 8. — С. 275–277.
193. *Martin C. L., Peng Z., Li Y.* Resolving the Mechanical and Radiative Feedback in J1044+0353 with Keck Cosmic Web Imager Spectral Mapping //. — 2024. — Май. — Т. 966, № 2. — С. 190.
194. Using KCWI to Explore the Chemical Inhomogeneities and Evolution of J1044+0353 / Z. Peng [и др.] //. — 2023. — Сент. — Т. 954, № 2. — С. 214.
195. Exploring chemical homogeneity in dwarf galaxies: a VLT-MUSE study of JKB 18 / B. L. James [и др.] //. — 2020. — ИЮЛЬ. — Т. 495, № 3. — С. 2564–2581.
196. *Kewley L. J., Dopita M. A.* Using Strong Lines to Estimate Abundances in Extragalactic H II Regions and Starburst Galaxies //. — 2002. — Сент. — Т. 142, № 1. — С. 35–52.
197. The O3N2 and N2 abundance indicators revisited: improved calibrations based on CALIFA and T_e -based literature data / R. A. Marino [и др.] //. — 2013. — Ноябрь. — Т. 559. — A114.
198. Superbubble Blowout in the Giant H II Region NGC 2363? / J.-R. Roy [и др.] //. — 1991. — ЯНВ. — Т. 367. — С. 141.
199. A kinematic study of the irregular dwarf galaxy NGC 2366 using HI and H α observations / J. van Eymeren [и др.] //. — 2009. — ЯНВ. — Т. 493, № 2. — С. 511–524.
200. IFU investigation of possible Lyman continuum escape from Mrk 71/NGC 2366 / G. Micheva [и др.] //. — 2019. — Март. — Т. 623. — A145.
201. The broad H α , [O III] line wings in stellar supercluster A of NGC 2363 and the turbulent mixing layer hypothesis / L. Binette [и др.] //. — 2009. — ИЮНЬ. — Т. 500, № 2. — С. 817–826.
202. Emission-line Wings Driven by Lyman Continuum in the Green Pea Analog Mrk 71 / L. Komarova [и др.] //. — 2021. — Окт. — Т. 920, № 2. — С. L46.

Список рисунков

- 2.1 Карта галактики NGC 4068 в эмиссионной линии $H\alpha$ (построена по наблюдениям на сканирующем ИФП) и вложенное изображение выбранной области вокруг объекта #А (сумма изображений в фильтрах $F606W$ и $F814W$, полученных на телескопе Hubble Space Telescope (HST)). Карта в эмиссионной линии $H\alpha$: положение Объекта #А отмечено черным кружком, который соответствует PSF изображения ($PSF = 2''$). Изображение HST: красный звездой отмечен Объект #А, желтыми звездами отмечены другие близкие кандидаты в звезды О-типа, находящиеся в изучаемой области галактики. Белым кружком отмечена область, соответствующая пространственному разрешению карты $H\alpha$. Обратите внимание, что только одна яркая звезда обнаружена на карте HST в предполагаемых границах туманности, окружающей объект #А. . 32
- 2.2 Правая панель: карта NGC 4068 в эмиссионной линии $H\alpha$. Левая панель: I- σ -диаграмма галактики NGC 4068. Цвета точек на схеме соответствуют цветам, обозначающим отдельные области на карте галактики. Оранжевым и серым цветом отмечены области диффузного газа, синим - области H II. Объекты #А, #В, #С лежат на диагонали диаграммы (красный цвет), что означает, что они могут соответствовать расширяющимся туманностям, образованным сильными звездными ветрами массивных проэволюционировавших звезд. 33

- 2.3 Карта $H\alpha$ в окрестности объекта #А (панель а) и примеры профиля линии $H\alpha$ в данных ИФП. На панелях (b) и (c) показаны наблюдаемый профиль линии $H\alpha$ (черный цвет), результаты фиттирования ее одиночного компонента профилем Фойгта (красный цвет) и остатки от вычитания (желтый цвет) для спектров, проинтегрированных в пределах туманности (внутри красного кружка на панели а) и в соседней области (внутри кольца, показанного зеленым цветом на панели а). Панель (d) демонстрирует профиль линии к юго-востоку от туманности (точное положение показано красной точкой на панели а), зеленым цветом показаны отдельные компоненты. Широкий компонент может быть вызван взаимодействием звездного ветра с окружающей МЗС. 37
- 2.4 Положения щелей спектрографов TDS и SCORPIO-2, наложенные на изображение NGC 4068 в эмиссионной линии $H\alpha$. Красные линии соответствуют спектрам TDS, черные — спектрам SCORPIO-2. 38
- 2.5 Спектр SCORPIO-2/БТА, сложенный из данных двух наблюдательных ночей (показан черным). Красная линия показывает результаты проведенной гауссовой аппроксимации эмиссионных линий. В спектре наблюдается необычно низкое отношение $[S\ II]/[N\ II]$ и наличие линии $He\ II\ \lambda 4686$ (на нижних панелях эти особенности показаны более подробно). 39
- 2.6 Спектр, сложенный из данных, полученных на 2,5-метровом телескопе TDS/КГО ($PA=41^\circ$). Обозначения цветов даны в подписи к рисунку 2.5. Линия $He\ II\ \lambda 4686$ не видна в спектре из-за меньшего отношения сигнал/шум. 40
- 2.7 Диаграмма цвет-величина, построенная для галактики NGC 4068 в полосах HST $F606W$ и $F814W$. Положение объекта #А отмечено на диаграмме красной звездой, а красная точка соответствует значениям до поправки за вклад эмиссионных линий туманности. Цветными точками показан Женевский эволюционный трек [24] звезды с массой $80M_\odot$, цвет соответствует эффективной температуре звезды. 41

- 2.8 Диаграмма ГР и эволюционные треки массивных звезд с низкой металличностью ($Z=0,002$) из эволюционных моделей [24] (левая панель) и [25] (правая панель). Черными кружками отмечены точки, принятые за источники ионизации для дальнейшего моделирования. Женевские треки (из [24]) не производят массивных звезд WR с такой низкой металличностью, тогда как треки из [25] демонстрируют совершенно другой эволюционный путь и производят звезды WR с $M > 70M_{\odot}$ 47
- 2.9 Левая панель: спектральные распределения энергии, рассчитанные для разных моделей центральной звезды. Правая панель: интенсивность линии He II λ 4686 в разных моделях. Только звезды типа WR имеют в своих модельных спектрах достаточно яркую линию He II λ 4686. 48
- 2.10 Сравнение значений X^2 , полученных для эмиссионных линий туманности (X^2 нормировано на количество линий) и χ^2 линии He II моделей объекта #A. Звезды BSG1, BSG2, WR1 и WR2 лучше воспроизводят эмиссионные линии туманности, чем звезды BSG3 и WR2. Но звезды WR, согласно нашему моделированию, значительно лучше воспроизводят линию He II, которую излучает звезда. Так как линия He II очень важна для диагностики состояния МЗС, далее для оценки параметров звезды, ионизирующей наблюдаемую туманность, используются звезды WR1 и WR3. 52
- 2.11 Сетки моделей CLOUDY для туманности, ионизованной звездой WR3, с разным разрешением. Верхняя панель: правый график показывает сетку с низким разрешением, левый график показывает более мелкую сетку в пространстве параметров вокруг минимального значения $\log(\sum_N \chi^2)$. Нижняя панель: на графиках показаны фрагменты более мелкой сетки модели, пересекающие минимальное значение X^2 . Цвет соответствует величине $\log(\sum_N \chi^2)$ 53

- 2.12 Черным цветом показан спектр туманности, полученный в наблюдениях на SCORPIO-2. Красным цветом показана наилучшая модель туманности. Линии в модельном спектре свернуты с гауссианой для визуального сравнения с наблюдениями. Наилучшая модель имеет следующие параметры: ионизирующая звезда WR3; параметры туманности: $R_{\max} = 15$ пк, $\log(N/O)=0,15$, $\log(n_e)=1,9 \text{ cm}^{-3}$ 54
- 3.1 Составное изображение $[S \text{ II}] + H\alpha +$ континуума, полученное на телескопе РТТ-150. Желтым пунктирным квадратом выделено поле фотометрических наблюдений в эмиссионной линии $H\alpha$ на 2,5-м телескопе КГО. Желтым сплошным квадратом показано поле изображения, полученного на фотометре с перестраиваемым фильтром MaNGaL в линии He II. Положения полей MUSE/VLT отмечены темно-синими квадратами. Символы белых звезд указывают на позиции кандидатов в звезды WR, описанных в работе [141]. 59
- 3.2 Карта галактики IC 1613 в эмиссионной линии $H\alpha$ (оранжевый) и распределение колонковой плотности H I (серый) из работы [94]. Контуров соответствуют распределению H I с уровнями $3, 10, 25, 50 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$. На левой панели представлена карта IC 1613 в эмиссионной линии $H\alpha$, полученная на 1,5-м телескопе РТТ-150. На правой панели показана часть карты, полученной с помощью 2,5-м телескопа КГО, на которой видны особенно слабые структуры ионизованного газа. Синие линии на карте обозначают положения щелей при длиннощелевой спектроскопии. Положения спектров интересующих объектов относительно щелей обозначены как S1–S10, соответствующие спектры показаны на рис. 3.4 и 3.5. Красными звездами отмечены позиции OB-ассоциаций из каталога [100]. Кандидаты в звезды Вольфа-Райе (сWR) из работы [141] отмечены голубыми звездами #1–8. 61

- 3.3 Диагностические ВРТ-диаграммы, показывающие отношения линий $[\text{O III}]/\text{H}\beta$ в зависимости от $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ (левая панель) и $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ (правая панель) для слабых ионизованных оболочек, перечисленных в таблице 7. Соответствующие спектры показаны на рис. 3.4 и 3.5. Диаграммы включают черные и серые кривые из [61] и [62], которые служат границей между областями фотоионизации (расположенными слева от линий) и областями с высоким вкладом других механизмов возбуждения. Модели с фиксированными $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8,0$ и $\text{N}/\text{O} = -1,5$ из [63] наложены на графики в виде гистограммы. Желтые точки соответствуют данным MUSE/VLT для яркой области $\text{H}\alpha$, в которой преобладает фотоионизация (соответствующая область отмечена голубым квадратом на рис. 3.1). 63
- 3.4 Спектры S1–S5 слабых областей H II B1–B3, полученные на 6-м телескопе БТА. Потоки, соответствующие эмиссионным линиям, перечислены в таблице 7. Нумерация спектров соответствует нумерации на рис. 3.2 64
- 3.5 Спектры S6–S10 слабых областей H II B4–B7 полученные на 6-м телескопе БТА. 65
- 3.6 Изображения, полученные на фотометре с перестраиваемым фильтром MaNGaL в эмиссионной линии He II до (слева) и после (справа) вычитания континуума. Синие кружки (диаметром 10 угловых секунд) окружают cWR-звезды из работы [141], красным кружком выделена галактика фона J010457.6+020953. . 71
- 3.7 Области $15'' \times 15''$ вокруг кандидатов в WR-звезды показаны согласно их номерам в [141], также показана галактика фона J010457.6+020953. Слева направо: изображение обзора DESI Legasu в r -диапазоне [155], изображения MaNGaL в фильтре, центрированном по эмиссионной линии He II , до и после вычитания континуума. Синий круг имеет диаметр 6 угловых секунд. Δm показывает разницу между звездными величинами в фильтрах, центрированных на линии и континууме. 72

- 3.8 Линии $H\beta$ и $H\alpha$ из архивных данных MUSE/VLT для кандидатов в звезды WR #3, #4, #5, как указано в работе [141]. Первые пять спектров: черная линия показывает реальный профиль $H\beta$, нормированный на уровень континуума. Желтая линия показывает профиль линии после вычета излучения окружающего комплекса H II. Красной линией показана модель профиля линии звезды с эффективной температурой 30 кК. Объект #4 разделяется на группу из четырех звезд раннего спектрального класса с эффективными температурами ~ 30 кК. Объект #5 — звезда раннего спектрального класса, но достоверно оценить его температуру не представляется возможным из-за сильной эмиссии области H II в районе расположения звезды. Нижний правый спектр: черная линия показывает профиль $H\alpha$ от звезды. Моделирование (красная линия) показывает, что эмиссионных небулярных компонент нет, а есть только широкая эмиссия звезды. Описание моделирования и обсуждение см. в разделе 3.2. 74
- 3.9 Длиннощелевой спектр звезды с WR #2, полученный на телескопе БТА. 75
- 3.10 Звездообразные источники излучения в эмиссионной линии $H\alpha$ из архивных данных MUSE/VLT; Положения двух звезд с профилем типа PCyg, найденных среди эмиссионных звезд, показаны голубыми звездами. Основная карта представляет собой изображение в эмиссионной линии $H\alpha$, полученное с помощью телескопа РТТ-150. 77
- 3.11 Звезды из архивных данных MUSE/VLT, демонстрирующие профиль типа PCyg в линии $H\alpha$ 77

- 4.1 Изображение галактики NGC 2366 (левая панель), а также увеличенные области её центральной части (средняя панель) и области Mrk 71 (правая панель). Левая панель показывает изображение в линии $H\alpha$ с континуумом (красный цвет; данная работа), совмещённое с изображением звёздного континуума (серый цвет; DECaLS; [170]). Средняя панель представляет собой совмещение изображений в эмиссионных линиях $H\alpha$ (красный; данная работа) и $[O III]$ (зелёный; данная работа), отображающих ионизованный газ; в дальнем УФ (синий; GALEX; [171]), отслеживающем молодое звёздное население; а также в линии $H I$ 21 см (серый; LITTLE THINGS; [172]), отслеживающей атомарный газ. На правой панели демонстрируется трёхцветное изображение области Mrk 71, полученное на основе узкополосных изображений HST с фильтрами F656N (центрирован на $H\alpha$; красный), F502N (центрирован на $[O III]$; зелёный) и F373N (центрирован на $[O II]$; синий) из работы [173]. Позиции длинной щели, соответствующие наблюдениям со SCORPIO-2, показаны жёлтыми линиями на средней панели, с увеличением области Mrk 71 для щели с $PA=34^\circ$ на левой панели. Белая пунктирная линия на средней панели указывает поле зрения, соответствующее данным ИФП. Серый круг на правой панели обозначает положение оболочки вокруг узла A [173]. 82

- 4.2 Карты отношений эмиссионных линий в галактике NGC 2366, полученные из изображений в узкополосных фильтрах, соответствующих эмиссионным линиям $H\alpha$, $[S\ II]$ и $[O\ III]$. Панель ‘a’ демонстрирует карту NGC 2366 в линии $H\alpha$ с наложенными положениями областей $H\ II$, определённых в данной работе. Панели ‘b’ и ‘c’ демонстрируют соотношения $[S\ II]/H\alpha$ и $[O\ III]/H\beta$ соответственно. Значения $H\beta^*$ получены как $H\alpha/3.1$, где коэффициент 3.1 соответствует наблюдаемому медианному значению отношения $H\alpha/H\beta$, полученному из длиннощелевых спектров (см. Табл. 10). Область Mrk 71 и область истечения газа (показанная фиолетовыми линиями на панели ‘c’) чётко выделяются, демонстрируя высокий уровень ионизации газа в галактике (высокое значение $[O\ III]/H\beta$) и низкое отношение $[S\ II]/H\alpha$ 83
- 4.3 Карта классификации источников (a) и $I-\sigma$ диаграмма (b), окрашенные в соответствии с классификацией, описанной в тексте (см. раздел 4.1.2). Класс C1 соответствует диффузному ионизованному газу, C2 — областям $H\ II$, C3 — промежуточному классу с повышенной дисперсией скоростей, C4 — областям возмущённого ионизованного газа (например, расширяющимся оболочкам и турбулентной МЗС), C5 — кандидатам в отдельные источники с высокой механической энергией. Для сравнения представлены изображение в линии $H\alpha$ (c) и карта дисперсии скоростей (d). На панели (b) показаны взвешенное среднее значение дисперсии скоростей (сплошная линия) и его 1σ -отклонение (пунктирные линии); на панели (d) наложены положения щелей при длиннощелевой спектроскопии. Объекты, идентифицированные в разделе 4.1.2 и пространственно неразрешённые в наших данных, обозначены кружками, за исключением одного объекта с явно выраженной оболочечной морфологией, выделенного большим кругом. 85

- 4.4 Профили областей с высокой дисперсией скоростей, выявленные по данным интерферометрии Фабри-Перро. Центральная панель показывает распределение интенсивности в линии $H\alpha$ и положение щелей, используемые при последующей спектроскопии на телескопе БТА (чёрные линии). Положения областей с турбулентными движениями, обнаруженных в данной работе, обозначены голубыми звёздами и кругом, тогда как рентгеновские источники и остатки сверхновых из предыдущих исследований отмечены розовыми и тёмно-синими квадратами соответственно. Боковые панели демонстрируют профили линии $H\alpha$ в выделенных областях. На боковых панелях также показаны модели спектральной линии с вписанными компонентами Фойгта (от 1 до 3 компонент, обозначены розовым цветом), отдельные компоненты (тёмно-синий), а также остатки после вычитания модельного спектра (светло-зелёный). Центральный квадрат соответствует области, показанной на рис. 4.5. 86
- 4.5 То же, что и на рис. 4.4, но для области Mrk 71 и её окрестностей. 87
- 4.6 Длиннощелевые спектры областей $H II$, пересечённых щелями $PA=87^\circ$ и $PA=32^\circ$, соответствующие пределам суммирования для оценки содержания кислорода $12 + \log(O/H)$. Каждый спектр сопровождается дополнительной панелью с увеличенным участком линии $[O III] \lambda 4363$, на которой показана аппроксимация линии для тех спектров, где отношение $S/N_{[OIII]} > 3$. Для определения температуры в областях методом T_e часть спектров была усреднена в более узких пределах, соответствующих диапазону видимости линии $[O III] \lambda 4363$. Такие области отмечены символом «*». 91
- 4.7 То же, что на рис. 4.6 для длиннощелевых спектров областей $H II$, пересечённых щелями $PA=32^\circ$ и $PA=34^\circ$ 92

- 4.8 Положения щелей наложены на цветное изображение (в фильтрах $B + V + H\alpha$) галактики NGC 2366 (a,b,c) и на карту дисперсии скоростей (d,e,f). Распределения отношений интенсивностей эмиссионных линий вдоль щелей для линий $H\alpha$, $[S II]$, $[O III]$ и $[N II]$ приведены на панелях g,h,i для углов положения $PA=32^\circ$ (слева), $PA=87^\circ$ (в центре) и $PA=34^\circ$ (справа). Нижние панели (j,k,i) показывают оценки содержания кислорода ($12 + \log(O/H)$), полученные методом T_e и S-калибровкой. 94
- 4.9 Диагностическая BPT-диаграмма, основанная на разделительных кривых из работ [61] (чёрная линия) и [62] (серая линия), показывающая границу между фотоионизованными областями (слева от линий) и областями с существенным вкладом ударного возбуждения. Модели из работы [63] для содержания кислорода $12 + \log(O/H) = 8.0$ и отношения $N/O = -1.5$ представлены в виде зелёной гистограммы с цветовой шкалой, обозначающей плотность ячеек сетки моделей фотоионизации в зависимости от соотношений линий. Голубая пунктирная линия разделяет области, в которых может присутствовать вклад ударных волн в ионизацию (см. раздел 4.1.3). Также показано соотношение $[S II]/H\alpha$ vs $[O III]/H\beta$, полученное по фотометрическим данным с 2,5-м телескопа КГО в узкополосных фильтрах $[S II]$, $H\alpha$ и $[O III]$ совместно с соответствующей дисперсией скоростей для каждой из областей, оцененной по наблюдениям ИФП (цветовая шкала). Показаны положения исследуемых областей по данным щелевой спектроскопии: Mrk 71 (розовый «+»), NGC 2363 (синий «x») и другие регионы (красный «x»). 95

4.10 График демонстрирует две области спектра 65 (центральная часть Mrk 71) вблизи спектральных линий $H\alpha$ и $[O\ III]$, демонстрирующие наличие широких компонент. Для получения надёжной модели спектра все линии в каждом спектральном окне были аппроксимированы одновременно. На двух верхних панелях представлены спектры в логарифмическом масштабе (показаны чёрным цветом), на которые наложены наилучшие модельные аппроксимации (красным) и их отдельные компоненты. На нижних панелях показаны те же области спектра в линейном масштабе с учётом ошибок (серым цветом). . 98

Список таблиц

1	Журнал наблюдений всех данных, полученных для выполнения работы: название набора данных, дата наблюдений, общее время экспозиции T , поле зрения (FOV), угловой размер элемента изображения, качество изображения (θ), спектральный диапазон ($\Delta\lambda$) и спектральное разрешение ($FWHM$)	25
2	Отношения потоков в эмиссионных линиях с учетом поправки за покраснение, измеренные по двум спектрам туманности (SCORPIO-2/БТА и TDS/КГО). Коррекция покраснения выполнялась с использованием Бальмеровского декремента, полученного из спектра SCORPIO-2/БТА.	43
3	Параметры моделей звезд, построенных с помощью кода SMFGEN в качестве центрального источника.	45
4	Сетка параметров моделей туманности	49
5	Содержание химических элементов $\log(X/H)$ в моделях туманности, где X/H — содержание элемента по отношению к водороду. Для азота указано исходное значение. Значение металличности галактики задано равным $Z=0,1 Z_{\odot}$, данные значения масштабированы на эту металличность.	50
6	χ^2 для рассматриваемых линий наилучшей спектральной модели туманности, ионизированной звездой WR3.	53
7	Потоки эмиссионных линий относительно линии $H\beta$ для исследуемых областей в IC 1613. Для линий, не превышающих предел шума, оценен верхний предел потока (см. подробное описание метода в 3.1.1).	66
8	Координаты 32 звезд из архивных данных MUSE/VLT, демонстрирующих эмиссию в линии $H\alpha$	76
9	Параметры компонентов линии $H\alpha$, показанных на рис. 4.4, 4.5	84
10	T_e и $12 + \log(O/H)$, определенные T_e -методом.	96