

На правах рукописи

Топчиева Анастасия Павловна

**Морфология и эволюция инфракрасных
кольцевых туманностей вокруг областей
ионизованного водорода**

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук

Научный руководитель:

д.ф.-м.н. Вибе Дмитрий Зигфридович, зав. отделом физики и эволюции звезд ФГБУН Института астрономии РАН, г. Москва

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н., проф. Щекинов Юрий Андреевич, г.н.с. ФГБУН физического Института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва

к.ф.-м.н. Гварамадзе Василий Васильевич, в.н.с. Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Ведущая организация:

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН» (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород

Защита состоится 14 сентября 2020 года в 15:30 на заседании диссертационного совета Д002.280.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д.48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Института астрономии РАН и на сайте <http://www.inasan.ru>.

Автореферат разослан « » 2020 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 002.280.01, к.ф.-м.н.

Н. В. Чупина

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Массивные звёзды играют весьма существенную роль в эволюции Вселенной и в то же время являются важным инструментом её исследования. Массивные звёзды считаются основным источником тяжёлых элементов, поступающих в межзвёздную среду (МЗС). Тяжёлые элементы в атомно-ионной форме, а также в составе пылинок и молекул, ответственны за охлаждение межзвёздного вещества [1]. Поэтому наличие массивных звёзд во многом определяет фазовое состояние МЗС и существенно влияет на процесс формирования звёзд и планет. На ударных волнах от массивных звёзд, вспыхнувших как сверхновые, ускоряются галактические космические лучи, которые влияют на физическую и химическую структуру МЗС [2, 3]. Одним из основных факторов влияния массивных звёзд на МЗС является яркое ультрафиолетовое (УФ) излучение, приводящее к формированию областей ионизованного водорода (НИ) [4]. Возраст массивных звёзд, как правило, не превышает 10 млн. лет, что много меньше характерного времени изменения структуры дисковых галактик (в частности Млечного Пути), поэтому их можно считать хорошим индикатором распределения областей активного звездообразования в Галактике [5, 6, 7].

Несмотря на важную роль, которую массивные звёзды играют в формировании и эволюции структуры Галактики, наше понимание процессов их образования и ранних стадий эволюции по-прежнему неполно. Одна из причин состоит в том, что эволюция массивных звёзд происходит внутри газопылевой оболочки, которая не успевает рассеяться за

время их формирования. Оптическое и инфракрасное (ИК) излучение молодой массивной звезды скрыто этой оболочкой, что затрудняет наблюдение ранних стадий её образования и эволюции по сравнению с маломассивными звёздами [1]. По этой же причине недостаточно изучено воздействие молодых О-В звёзд на окружающие их газопылевые оболочки.

Как говорилось выше, влияние массивных звёзд на МЗС обусловлено прежде всего их интенсивным УФ излучением. Взаимодействие газа с излучением приводит к возникновению ионизационного и ударного фронтов и формированию областей НП [4]. Согласно наблюдениям областей НП в среднем ИК и радиодиапазонах их можно разделить на три группы [1]:

1. Гиперкомпактные и ультракомпактные области НП (размер менее 0.1 пк, концентрация электронов $> 10^4 \text{ см}^{-3}$). Эти области очень небольшие и плотные, газ ионизован и находится в непосредственной близости к ионизирующей звезде. Гиперкомпактные области НП, вероятно, представляют собой отдельные объекты с аккреционными дисками. Ультракомпактные области НП представляют собой объекты, где звезда окружена плотным газом, а диска нет.
2. Компактные и классические области НП имеют размеры порядка нескольких парсеков, концентрацию электронов порядка 10^2 см^{-3} . Предполагается, что ионизация таких областей НП может быть вызвана несколькими массивными звёздами.
3. Гигантские области НП: размер порядка 100 пк, концентрация электронов $< 30 \text{ см}^{-3}$.

Не исключено, что все эти объекты представляют собой этапы единого процесса. Обычно высказывается предположение, что чем меньше и плотнее область НП, тем она моложе, а с возрастом уменьшается концентрация вещества и увеличивается радиус. Но эволюционные связи между областями НП различных типов пока неясны.

Согласно установившимся представлениям (см., например, [8]), между областью НП и окружающим её газом родительского молекулярного облака существует переходный регион — т.н. фотодиссоционная область (ФДО). В этой области водород преимущественно нейтрален, но степень ионизации газа составляет примерно 0.01% за счёт ионизованного углерода. Концентрация и температура газа и пыли в ФДО обычно достаточно высоки, поэтому ФДО ярко светят в ИК диапазоне.

Исследование морфологии ИК излучения в нашей Галактике в последнее время в значительной степени опирается на наблюдения космического телескопа *Spitzer*. Наблюдательные данные с этого инструмента показали, что ИК излучение часто проявляет себя в виде кольцевых или арочных структур, предположительно связанных с воздействием горячих массивных звёзд на МЗС [9]. Подобные кольцевые структуры в русскоязычной литературе обычно называют инфракрасными кольцевыми туманностями (ИККТ) [10]. В работе [11] представлен каталог ИККТ, и высказано предположение, что кольцевые туманности являются проекциями трёхмерных оболочек (“bubble”, пузырь). Предполагалось, что оболочка имеет сферическую форму, образуя кольцо в проекции на картинную плоскость. В работе [12] было показано, что 86% объектов из каталога [11] можно классифицировать как области НП, сформировавшиеся вокруг массивной горячей звезды класса О или В, или нескольких таких звёзд. Таким образом, ИККТ можно считать не какими-то само-

стоятельными объектами, а наблюдаемым проявлением пылевой структуры областей НП и окружающей их МЗС. Тем не менее, для общности далее во всей диссертации автор использует по отношению к данным объектам термин ИККТ.

Первые каталоги ИККТ, основанные на данных телескопа Spitzer, включали более 6 000 объектов (см. [11, 13]). Позднее были созданы каталоги “The WISE Catalog of Galactic НП Regions V2.2” и “Vialactea. The Milky Way as a Star Formation Engine” [14, 15], в которые было включено более 8 000 галактических областей НП и кандидатов в ИККТ.

Основу каталога [11, 13] составили изображения на длине волны 8 мкм. Однако для кольцевых ИККТ характерна специфическая морфология и на других длинах волн ИК диапазона, что учтено в каталогах [14, 15]. Внутри практически всех колец или арок излучения на 8 мкм наблюдается излучение на 24 мкм (см., напр., [16]). Оно обычно объясняется тепловым излучением пыли, так как в этом диапазоне нет сильных молекулярных линий. Традиционно считается, что в излучении на 8 мкм проявляют себя главным образом полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) [17]. Отсутствие или слабость эмиссии на 8 мкм внутри кольцевых туманностей могут быть связаны с тем, что в пределах ИККТ ПАУ полностью разрушены УФ-излучением центральной звезды [18]. С другой стороны, поскольку ИК излучение ПАУ возбуждается при поглощении УФ фотонов, чем дальше от звезды находятся ПАУ (или другие мелкие ароматические частицы), тем слабее интенсивность их излучения. Таким образом, кольцо на 8 мкм, по-видимому, находится между зоной разрушения ПАУ и зоной, где ПАУ не видны.

В литературе обычно под *внешней областью* ИККТ понимается кольцо эмиссии в различных диапазонах, примерно совпадающее с коль-

цом эмиссии на 8 мкм. Под *внутренней областью* понимается область, находящаяся внутри кольца эмиссии на 8 мкм [19]. С внешним кольцом эмиссии на 8 мкм совпадает также менее яркое кольцо излучения на 24 мкм, но бóльшая часть излучения ИККТ на 24 мкм исходит из внутренней области. Внутреннее излучение на 24 мкм выглядит как центральный пик или протяженная эмиссия, довольно часто напоминающая кольцо или арку меньшего диаметра, чем внешнее кольцо. Излучение на 70, 100 и 160 мкм, также выглядит как внешнее кольцо, окружающее ионизованную область.

Изучение причин специфического распределения ИК излучения на различных длинах волн в ИККТ представляет большой интерес, т.к. позволяет исследовать структуру и эволюцию пылевой компоненты областей НП. Одно из таких исследований проведено в работе [18], где ИККТ моделируется как проявление расширяющейся области НП. Излучение пыли в этой работе рассматривалось с помощью одномерной модели расширяющейся области НП MARION [20]. Пыль считалась динамически замороженной в газ; фоторазрушение ПАУ учитывалось при помощи феноменологического выражения. В этой работе было показано, что при этих условиях отсутствие центральной эмиссии на 8 мкм невозможно объяснить без учёта фоторазрушения ПАУ. Появление внешнего кольца на 24 мкм, совпадающего с кольцом на 8 мкм, в рамках этой модели удалось объяснить стохастическим нагревом мелких углистых пылинок, но наличие внутреннего кольца на 24 мкм осталось необъяснённым.

Ещё одно исследование в этом направлении было проведено в работе [21] с использованием модернизированного кода MARION [20]. Был рассмотрен дрейф заряженной пыли под действием давления излуче-

ния в области НП. В рамках этой модели стало возможным качественно объяснить внутреннюю кольцевую эмиссию на 24 мкм неоднородным распределением пылинок различных размеров внутри области НП.

В работах [18] и [21] в качестве эталонной рассматривалась область НП RCW120. На ИК изображениях она выглядит как практически идеальная окружность [22, 23], и это позволяло предположить, что к объекту RCW120 могут быть применимы выводы, получаемые из анализа одномерных моделей. В частности, использование для RCW120 одномерной динамической модели расширения ИККТ позволило предположить, что вокруг этого объекта происходит образование молодых звёздных объектов в рамках сценария сбора и сжатия (“collect-and-collapse”) [24]. Практически идеальная правильная форма объекта RCW120 привлекла к нему внимание и других исследователей, строивших динамические модели этой области. Интересно, однако, что согласно некоторым работам [24, 25, 26] наблюдаемые характеристики RCW120 всё же для своего объяснения требуют, как минимум, двухмерной гидродинамической модели [27], а как максимум, трёхмерной гидродинамической модели, например, в предположении, что в этой области молодая массивная звезда влетает в молекулярное облако и излучение пыли на 24 мкм образует арку вокруг звезды [25]. В работе [28] рассмотрен сценарий образования RCW120 в ходе столкновения двух газопылевых облаков, сквозь которые движется массивная молодая звезда. Иными словами, объект, который на первый взгляд выглядит как одномерный идеальный пузырь (“perfect bubble”), при более детальном рассмотрении может оказаться весьма отличным от такого упрощённого представления, и далеко не все его особенности могут быть описаны в рамках одномерной сферически-симметричной модели. Очевидно, что более детальное количественное

сопоставление результатов одномерного моделирования с результатами наблюдений требует выбора более подходящих реальных объектов.

Для сравнения результатов эволюционного моделирования с результатами наблюдений и отождествления ИК изображений, полученных при помощи телескопов Spitzer, Herschel и других, с конкретной стадией развития ИККТ, необходимо изучать не один или два объекта, а более обширную выборку. Изучение ИККТ заключается в исследовании морфологии, размеров, плотности и потоков излучения на различных длинах волн (например, [14, 15, 29, 30, 31, 32, 33, 34]). Это позволит сравнивать наблюдения с результатами химико-динамических моделей, как одномерных, так и двух-, трёхмерных, которые учитывают ветер от звезды, её движение, магнитное поле и т.д. Одним из важных инструментов дальнейшего теоретического исследования ИККТ является статистический анализ данных наблюдений (см. [7, 35, 36, 40, 41]).

В данной диссертационной работе соискателем был поставлен ряд целей, достижение которых позволяет углубить наше понимание эволюции пыли в ИККТ (в частности в областях НП), а также эволюции массивных звёзд и вещества, окружающего их. Также ставилась задача подготовки (отбора) наблюдательного материала (построения рабочего каталога ИККТ), наиболее подходящего для обеспечения максимально информативного теоретического анализа.

Цели и задачи диссертационной работы

1. Составление выборки (рабочего каталога) замкнутых ИККТ, перспективных для сопоставления с результатами одномерного гидродинамического моделирования расширяющихся областей НП.

2. Определение свойств центральных источников излучения и концентрации газа в областях НП.
3. Детальный анализ излучения областей НП и сравнение результатов моделирования с наблюдательными характеристиками излучения ИККТ.
4. Выбор спектрального индекса, который может использоваться для оценки температуры пылевой компоненты.

Основные положения, выносимые на защиту

1. При помощи разработанной соискателем автоматической процедуры определены позиционные и морфологические характеристики ИККТ, имеющих замкнутую эллипсоподобную структуру на 8 мкм: координаты центра, эксцентриситет, позиционный угол, большая полуось. По результатам анализа 99 объектов составлен рабочий каталог из 32 “идеальных” ИККТ с выраженной кольцевой структурой, являющихся подходящими объектами для сравнения с результатами теоретических одномерных химико-динамических моделей. Показано, что у большинства объектов морфологические параметры, определённые по эмиссии на 8 и 70 мкм, совпадают. Это указывает, что источники излучения на этих длинах волн одинаково локализованы в пространстве.
2. Показано, что адекватным индикатором температуры пыли в оболочке является спектральный индекс $\alpha_{70/160}$, описывающий наклон спектра между 70 и 160 мкм. Использование более коротких длин волн осложняется необходимостью учёта излучения стохастически

нагретых мелких пылинок и ПАУ. В более длинноволновом диапазоне (от 250 до 500 мкм) отдельное рассмотрение потоков от оболочки и внутренней области затруднено из-за недостаточного пространственного разрешения наблюдательных данных.

3. Оценена массовая доля ПАУ ($q_{\text{РАУ}}$) в рассматриваемых ИККТ. Подтверждено теоретическое предсказание о низком содержании ПАУ и мелкой пыли внутри областей НП.
4. Определены потоки в радиоконтинууме на длине волны 20 см в направлении на 91 ИККТ. Установлено, что потоки в ИК диапазоне на длинах волн 8, 24 и 160 мкм возрастают с увеличением потока на 20 см. Оценены эффективные температуры центральных источников.

Научная новизна Проведён анализ морфологии ИККТ, ассоциированных с областями НП. Исследовано влияние неоднородного распределения излучения на определение размеров и формы областей выборки. Произведены оценки УФ потока и доли ПАУ. По радиоданным получены эффективные температуры центральных звёзд. Впервые составлен каталог, включающий в себя все эти характеристики.

Полученные в диссертации результаты важны для понимания формирования излучения и эволюции ИККТ, относящихся к областям НП. Основные результаты используются для обоснования подходов к сравнению теоретических исследований с наблюдательными данными. После соответствующей модификации они могут применяться и для анализа инфракрасных туманностей другой природы: планетарных туманностей, туманностей у звёзд Вольфа-Райе.

Научная и практическая значимость В настоящее время ИККТ привлекают к себе внимание не только как области звездообразования, возможно, стимулированного воздействием массивной звезды или группы таких звёзд, но и как естественные лаборатории для изучения эволюции различных компонент пыли (разного химического состава и размера). Количество накопленных наблюдательных данных с каждым годом увеличивается, что обуславливает важность их систематизации и анализа. Научная и практическая значимость диссертации заключается в систематизации данных об областях НП, обладающих примерной сферической симметрией. Эти результаты могут быть использованы научными группами, занимающимися моделированием эволюции этих объектов с учётом движения пылевой компоненты и её разрушения. В диссертационной работе впервые представлен каталог характеристик поля излучения и других параметров ИККТ.

Методология и методы исследования Задачи диссертации решались при помощи анализа архивных наблюдательных данных, полученных на телескопах Spitzer, Herschel и VLA. Данные загружались из соответствующих архивов и анализировались при помощи авторского программного обеспечения, написанного на языке программирования Python.

Достоверность представленных результатов Достоверность представленных в диссертационной работе результатов исследования морфологии инфракрасного излучения инфракрасных кольцевых туманностей, ассоциированных с областям ионизованного водорода, подтвержда-

ется сравнением с теоретическими и наблюдательными данными и обсуждением полученных результатов на конференциях и семинарах. Основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Апробация работы Результаты, представленные в диссертации, были представлены в качестве устных и стендовых докладов:

1. 45-я студенческая научная конференция “Физика Космоса”, г. Екатеринбург, Россия, 01–05 февраля 2016 г.
2. Всероссийская конференция XXXIII “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, ПРАО АКЦ ФИАН, г. Пущино, Россия, 19–22 апреля 2016 г.
3. Всероссийская конференция “VI Пулковская молодёжная астрономическая конференция”, ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, 06–08 июня 2016 г.
4. Международная конференция “Физика звёзд: от коллапса до коллапса”, САО РАН, пос. Нижний Архыз, Россия, 03-07 октября 2016 г.
5. Международный российско-индийский семинар “Радиоастрономия и звездообразование”, ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, 10-12 октября 2016 г.
6. Конкурс молодых учёных, ИНАСАН, г. Москва, Россия, 31 октября 2016 г.
7. Всероссийская конференция 59 научная конференция МФТИ, г. Москва, Россия, 21–26 ноября 2016 г.

8. Объединённый научный семинар кафедры “Физика Космоса” и физического факультета ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия, 6 декабря 2016 г.
9. 46-я студенческая научная конференция “Физика Космоса”, г. Екатеринбург, Россия, 30 января – 03 февраля 2017 г.
10. XIV конференция молодых учёных “Фундаментальные и прикладные космические исследования”, ИКИ РАН, г. Москва, Россия, 12–14 апреля 2017 г.
11. Всероссийская конференция XXXIV “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, г. Пущино, Россия, 18–21 апреля 2017 г.
12. 13th Summer School on Modern Astrophysics in commemoration of the 100th anniversary of Vitaly L. Ginzburg, г. Москва, Россия, 03–15 июля 2017 г.
13. Summer school “Formation of complex molecules in space and on planets — From interstellar clouds to life”, г. Тарту, Эстония, 17–22 июля 2017 г.
14. Семинар кафедры “Теоретической физики и волновых процессов” в ВолГУ, г. Волгоград, Россия, 5 сентября 2017 г.
15. Всероссийская астрономическая конференция (ВАК — 2017), г. Ялта, Россия, 17–22 сентября 2017 г.
16. Конкурс молодых учёных, ИНАСАН, г. Москва, Россия, 03 ноября 2017 г.

17. Конференция “Звездообразование и планетообразование. Наблюдения, теория, численный эксперимент”, АКЦ ФИАН, г. Москва, Россия, 13–15 ноября 2017 г.
18. 47-ая студенческая научная конференция “Физика Космоса”, г. Екатеринбург, Россия, 29 января – 02 февраля 2018 г.
19. XV конференция молодых учёных “Фундаментальные и прикладные космические исследования”, ИКИ РАН, г. Москва, Россия, 11–13 апреля 2018 г.
20. Всероссийская конференция XXXV “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, г. Пущино, Россия, 24–27 апреля 2018 г.
21. VII Пулковская молодёжная астрономическая конференция, ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, 28–31 мая 2018 г.
22. 14th Summer School on Modern Astrophysics, г. Москва, Россия, 02–13 июля 2018 г.
23. Международная конференция “Звёзды, планеты и их магнитные поля”, СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, 17–21 мая 2018 г.
24. Конференция “Звёзды и спутники”, посвящённая 100-летию со дня рождения проф. А. Г. Масевич, г. Москва, Россия, 15–16 октября 2018 г.
25. Конференция “Звездообразование и планетообразование II”, АКЦ ФИАН, г. Москва, Россия, 13–14 ноября 2018 г.
26. Конкурс молодых учёных, ИНАСАН, г. Москва, Россия, 15 ноября 2018 г.

27. EWASS 2019, г. Лион, Франция, 24–29 июня 2019 г.
28. The 1st summer school on astrophysics, spectroscopy and quantum chemistry, г. Торунь, Польша, 01–12 июля 2019 г.
29. 49th Young European Radio Astronomers Conference, г. Дублин, Ирландия, 26–29 августа 2019 г.
30. Конкурс молодых учёных, ИНАСАН, г. Москва, Россия, 24 октября 2019 г.
31. Конференция “Звездообразование и планетообразование II”, АКЦ ФИАН, г. Москва, Россия, 12–13 ноября 2019 г.

Личный вклад автора

Соискатель в равной степени участвовал в постановке задач. Им разработано оригинальное программное обеспечение для анализа наблюдательных данных, проведено необходимое тестирование. Соискателем выполнены расчёты, проанализированы полученные результаты, сформулированы выводы.

В частности, соискателем:

1. Разработан метод анализа наблюдательных данных и поиска замкнутых ИККТ.
2. Создан каталог объектов исследования, включающий определённые соискателем морфологические параметры: эксцентриситет, размеры, позиционный угол.

3. Определены полные потоки излучения ИККТ, а также отдельно потоки излучения внутренних и внешних областей в среднем ИК, дальнем ИК и радиодиапазонах.
4. Оценена массовая доля ПАУ в объектах исследования.
5. Определён спектральный класс источников ионизирующего излучения.
6. Определены спектральные индексы ИККТ в ИК диапазоне (от 8 мкм до 500 мкм), а также выделен спектральный индекс, наиболее подходящий для определения температуры.

Структура и объем диссертации (степень её разработанности)

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Число страниц в диссертации 118, рисунков 26, таблиц 7. Список литературы состоит из 86 наименований. По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них 5 входит в перечень ВАК.

Содержание работы

Во **Введении** представлен краткий обзор содержания диссертации, объектов исследования, описана актуальность диссертационной работы, цели, задачи, новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость. Представлена информация по апробации результатов, научным публикациям по результатам исследований соискателя и его вкладу.

В **Главе 1** описана методика поиска ИККТ, связанных с областями НП, и процедура составления рабочего каталога ИККТ, содержащего

99 объектов, имеющих выраженную эллипсоидальную или кольцевую форму. В каталоге выделено 32 объекта, форма которых близка к круговой, а размер позволяет хорошо разрешить детали структуры (эксцентриситет вписанного эллипса на 8 мкм не превышает 0.6, угловой радиус превосходит $20''$). Эти объекты можно уверенно использовать для сопоставления с результатами одномерного гидродинамического моделирования расширяющихся областей НП. Основные результаты данной главы опубликованы в работах [A1], [A5], [B1], [B2], [B3].

В **Главе 2** представлен расчёт полного потока излучения для 99 областей НП, ассоциированных с ИККТ из рабочего каталога. Выборка анализируемых объектов бралась из Главы 1. Используются данные наблюдений на следующих длинах волн: 8 и 24 мкм — данные с космического телескопа Spitzer, полученные при помощи фотометрических камер IRAC и MIPS, соответственно; 70 и 160 мкм — данные с фотометрической камеры PACS [38]; и 250, 350 и 500 мкм — данные с фотометрической камеры SPIRE [39] космического телескопа Herschel. Для всех объектов построены и проанализированы спектральные распределения энергии. Выявлены корреляции показателей цветов: $[F_{24}/F_8]$, $[F_{70}/F_{24}]$, $[F_{160}/F_{24}]$, $[F_{160}/F_{70}]$, при этом использованы критерии из работы [40], в которой по показателям цветов определяется принадлежность объектов к областям НП или планетарным туманностям. Также проведено сравнение с результатами [41], где рассчитаны потоки для внегалактических областей НП. Определены спектральные индексы в различных диапазонах, и найден спектральный индекс, который является хорошим индикатором температуры пылевой компоненты.

Получены оценки доли ПАУ (q_{PAU}) и интенсивности УФ излучения в ИККТ по сеткам моделей, предложенным в статье [42]. Рассмотрены

данные по ИК и радиопотокам из трёх каталогов областей НШ: каталог, представленный в данной диссертации, а также каталоги “The WISE Catalog of Galactic HII Regions V2.2” и “Vialactea. The Milky Way as a Star Formation Engine” [7, 14]. Приведено обсуждение того, как различные методы обработки данных, а также выбор начальных данных, могут повлиять на результаты теоретического анализа областей НШ. В частности, рассмотрена возможность и точность оценки потока УФ квантов, спектрального класса ионизирующего источника излучения и массовой доли ПАУ по известной величине потока радио и ИК излучения от областей НШ. Основные результаты данной главы опубликованы в работах [A2], частично опубликованы в работе [A4], [B4], [B5].

В **Главе 3** рассчитаны потоки от областей НШ в радиоконтинууме на длине волны 20 см. Оценены спектральные классы ионизирующих звёзд для 42 областей, для которых известны оценки расстояний. Полученные спектральные классы лежат в интервале от B0.5 до O7, что соответствует интервалу эффективных температур от 29 000 до 37 000 К. Рассмотрена корреляция потоков в ИК диапазоне на длинах волн 8, 24 и 160 мкм и потока на 20 см. Потоки в ИК диапазоне используются для диагностики нагретого вещества, а поток в радиодиапазоне — для измерения количества ионизирующих квантов. Установлено, что значения потоков в ИК диапазоне приблизительно линейно растут с увеличением потока в радиодиапазоне. Основные результаты данной главы опубликованы в работах [A3], частично опубликованы в работе [A4], [B6], [B7], [B8].

В **Заключении** суммированы основные результаты работы. Представлена информация по апробации результатов и научным публикациям исследований.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- [A1] *Топчиева А. П., Вибе Д. З., Кирсанова М. С., Крушинский В. В.* Морфология излучения областей ионизованного водорода в инфракрасном диапазоне // *Астрономический журнал*. — 2017. — Т. 61, № 12. — С. 1015-1030.
- [A2] *Topchieva A., Wiebe D., Kirsanova M. S.* Global photometric analysis of galactic HII regions // *Research in Astronomy and Astrophys.* — 2018. — V.18, article id. 091.
- [A3] *Топчиева А. П., Кирсанова М. С., Соболев А. М.* Спектральный класс ионизирующих звёзд и потоки инфракрасного излучения от областей HII // *Астрономический журнал*. — 2018. — Т. 62, № 11 — С. 764-773.
- [A4] *Topchieva A., Akimkin V., Smirnov-Pinchukov G.* Infrared photometric properties of inner and outer parts of HII regions // *Research in Astronomy and Astrophys* — 2019. — V.19. — P. 148-156.
- [A5] *Topchieva A., Wiebe D., Kirsanova M., Krushinsky V.* The Evolution of Dust and Infrared Radiation in HII Regions // *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* — 2017. — V.98. — P. 98-101.

Другие публикации автора по теме диссертации

- [B1] *Топчиева А. П., Вибе Д. З.* Эволюция пыли и инфракрасное излучение в областях ионизованного водорода // *Физика Космоса: труды 45-ой студенческой научной конференции* (Екатеринбург, 01

- 05 февр. 2016г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2016. — Т. 1. — С. 233.

- [B2] *Топчиева А. П.* Фотометрический анализ галактических областей ионизованного водорода // Физика Космоса: труды 46-ой студенческой научной конференции (Екатеринбург, 30 янв. - 03 февр. 2017г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2017 г. — Т. 1. — С. 223.
- [B3] *Topchieva A. P.* The morphology of infrared radiation from HII regions. Proceedings of the Russian-Indian workshop on radio astronomy and star formation, October 10-12, 2016 (eds. I. Zinchenko and P. Zemlyanukha), Institute of Applied Physics RAS. — 2017. — P. 77.
- [B4] *Топчиева А. П.* Глобальный фотометрический анализ галактических областей ионизованного водорода // Физика Космоса: труды 47-й Международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 29 янв. - 2 февр. 2018г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2018. — С. 236.
- [B5] *Топчиева А. П.* Исследование областей ионизованного водорода на поиск ионизирующего источника // 15-я Конференция молодых учёных “Фундаментальные и прикладные космические исследования” ИКИ РАН (Москва, 11 - 13 апреля 2018 г.). — Сборник тезисов под ред. А. М. Садовского. — 2018 г. — С. 113.
- [B6] *Топчиева А. П.* Сравнение потоков излучения зон НII по данным из разных каталогов // Сборник трудов мемориальной конференции 2018 г., посвящённой памяти академика А. А. Боярчука. / Сбор-

ник научных трудов ИНАСАН (Москва 2018 г.). — Москва: Изд-во Янус-К. — 2018. — С. 312 - 314.

[B7] *Топчиева А. П., Виле Д. З.* Связь галактических областей III с внегалактическими областями звездообразования // Сборник научных трудов ИНАСАН (Москва 2019 г.). — Москва: Изд-во Янус-К. — 2019. — С. 21–26.

[B8] *Топчиева А. П., Павлюченков Я. Н., Акимкин В. В., Курсанова М. С.* Моделирование инфракрасных спектров областей III // Сборник научных трудов ИНАСАН (Москва 2019 г.). — Москва: Изд-во Янус-К. — 2019. — С. 15–20.

Цитируемая литература

1. *Zinnecker H., Yorke H. W.* Toward understanding massive stars formation // *Annual Review of Astron. and Astrophys.* — 2007. — V. 45. — Pp. 481–563.
2. *Kennicutt R. C.* Star formation in galaxies along the hubble sequence // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics.* — 1998. — V. 36. — Pp. 189–232.
3. *Kennicutt R. C.* The role of massive stars in astrophysics // *Massive star birth: A crossroads of Astrophysics, IAU Symposium Proceedings of the international Astronomical.* — 2005. — N^o 227. — Pp. 3–11.
4. *Shu F. H.* The physics of astrophysics. Volume II: Gas dynamics // *Изд. University Science Books, Mill Valley, CA (USA).* — 1992. — Pp. 493. Ред. Shu F. H.

5. *Russeil D.* Star-forming complexes and the spiral structure of our Galaxy // *Astronomy and Astrophysics*. — 2003. — V. 397. — Pp. 133–146 .
6. *Reid M. J., Menten K. M., Brunthaler A.* et al. Trigonometric parallaxes of high mass star forming regions: the structure and kinematics of the Milky Way // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — V. 783. — Pp. 1–14.
7. *Anderson L. D., Bania T. M., Balser D. S.* et al. The WISE Catalog of Galactic H II Regions // *The Astrophysical Journal Supplement*. — 2014. — V. 212. Issue 1. article id. 1. — P. 18.
8. *Hollenbach D. J., Tielens A. G. G. M.* Photodissociation regions in the interstellar medium of galaxies // *Reviews of Modern Physics*. — 1999. — V. 71. — Pp. 173–230.
9. *van Buren D., McCray R.* Bow shocks and bubbles are seen around hot stars by IRAS // *Astrophys. J. Lett.* — 1988. — V. 329. — Pp. L93–L96.
10. *Лозинская Т. А.* Взрывы звезд и звездный ветер в галактиках // *Изд. Москва: КРАСНОДАР*.—2012.—P. 216.
11. *Churchwell E., Povich M. S., Allen D.* et al. The bubbling Galactic disk // *The Astrophysical Journal*. — 2006. — V. 649. — Pp. 759–778.
12. *Deharveng L., Schuller F., Anderson L. D.* et al. A gallery of bubbles. The nature of the bubbles observed by Spitzer and what ATLASGAL tells us about the surrounding neutral material // *Astron. and Astrophys.* — 2010. — V. 523. — Pp. 1–35.
13. *Churchwell E., Watson D. F., Povich M. S.* et al. The Bubbling Galactic Disk. II. The Inner 20 // *The Astrophysical Journal*. — 2007. — V. 670. — Pp. 428–441.
14. *Bufano F., Leto P., Carey D.* et al. First Extended Catalogue of

- Galactic bubble infrared fluxes from WISE and Herschel surveys // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — V. 473. — Pp. 3671–3692.
15. *Anderson L. D., Zavagno A., Barlow M. J.* et al. Distinguishing between HII regions and planetary nebulae with Hi-GAL, WISE, MIPS GAL, and GLIMPSE // *Astronomy and Astrophysics*. — 2012. — V. 537. — Pp. 1–11.
 16. *Watson C., Povich M. S., Churchwell E. B.* et al. Infrared dust bubbles: probing the detailed structure and young massive stellar populations of Galactic H II regions // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — V. 681. — Pp. 1341–1355.
 17. *Tielens A. G. G. M.* Interstellar polycyclic aromatic hydrocarbon molecules // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2008. — V. 46. — Pp. 289–337.
 18. *Pavlyuchenkov Y. N., Kirsanova M. S., Wiebe D. S.* Infrared emission and the destruction of dust in HII regions // *Astronomy Reports*. — 2013. — V. 57. — Pp. 573–585.
 19. *Топчиева А. П., Вибе Д. З., Кирсанова М. С., Крушинский В. В.* Морфология инфракрасного излучения в областях ионизованного водорода // *Астрономический журнал*. — 2017. — V. 61, № 12. — Pp. 1015–1030.
 20. *Kirsanova M. S., Wiebe D. S., Sobolev A. M.* Chemodynamical evolution of gas near an expanding HII region // *Astronomy Reports*. — 2009. — V. 53. — Pp. 611–633.
 21. *Akimkin V. V., Kirsanova M. S., Pavlyuchenkov Y. N., Wiebe D. S.* Dust dynamics and evolution in expanding H II regions. I. Radiative drift of neutral and charged grains // *Monthly Notices of the Royal*

- Astronomical Society*. — 2015. — V. 449. — Pp. 440–450.
22. Deharveng L., Zavagno A. RCW 120: A Perfect Bubble // *Handbook of Star Forming Regions, Volume II: The Southern Sky ASP Monograph Publications*. — 2018. — V. 5. — Pp. 437–437.
 23. Deharveng L., Zavagno A., Schuller F. et al. Star formation around RCW 120, the perfect bubble // *Astron. and Astrophys.* — 2009. — V. 496. — Pp. 177–190.
 24. Zavagno A., Pomarès M., Deharveng L. et al. Triggered star formation on the borders of the Galactic H ii region RCW 120 // *Astron. and Astrophys.* — 2007. — V. 472. — Pp. 835–846.
 25. Mackey J., Haworth T. J., Gvaramadze V. V. et al. Detecting stellar-wind bubbles through infrared arcs in H II regions // *Astron. and Astrophys.* — 2016. — V. 586, id. A114. — P. 16.
 26. Sánchez-Cruces M., Castellanos-Ramrez A., Rosado M., RodríguezGonzlez A., Reyes-Iturbide J. Kinematics of the Galactic Bubble RCW 120 // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofísica*. — 2018. — V. 54. — Pp. 375–388.
 27. Kirsanova M. S., Pavlyuchenkov Ya. N., Wiebe D. S. et al. Molecular envelope around the HII region RCW 120 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — V. 488. — Pp. 5641–5650.
 28. Torii K., Hasegawa K., Hattori Y. et al. Cloud-cloud collision as a trigger of the high-mass star formation: a molecular line study in RCW120 // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — V. 806. Issue 1, article id. 7. — Pp. 21.
 29. Helfand D. J., Becker R. H., White R. L. et al. MAGPIS: a multi-array galactic plane imaging survey // *The Astrophysical Journal*. — 2006. — V. 131. — Pp. 2525–2537.

30. Hoare M. G., Purcell C. R., Churchwell E. B. et al. The coordinated radio and infrared survey for high-mass star formation (The CORNISH survey). I. Survey design // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 2012. — V. 124. — Pp. 939–955.
31. Urquhart J. S., Moore T. J. T., Schuller F. et al. ATLASGAL - environments of 6.7 GHz methanol masers // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — V. 431. — Pp. 1752–1776.
32. Urquhart J. S., Thompson M. A., Moore T. J. T. et al. ATLASGAL - properties of compact H II regions and their natal clumps // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — V. 435. — Pp. 400–428.
33. Kim W. J., Urquhart J. S., Wyrowski F. et al. New detections of (sub)millimeter hydrogen radio recombination lines towards high-mass star-forming clumps // *Astron. and Astrophys.* — 2018. — V. 616, id. A107. — P. 19.
34. Giannetti A., Leurini S., Wyrowski F. ATLASGAL-selected massive clumps in the inner Galaxy. V. Temperature structure and evolution // *Astronomy and Astrophysics*. — 2017. — V. 603, id. A33. — P. 25.
35. Topchieva A., Wiebe D., Kirsanova M., Krushinsky V. The evolution of dust and infrared radiation in HII regions // *Stars: From Collapse to Collapse, Proceedings of a conference held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia 3-7 October 2016. Astronomical Society of the Pacific*. — 2017. — P. 98–101. РеД. Balega Yu. Yu., Kudryavtsev D. O., Romanyuk I. I., Yakunin I. A.
36. Makai Z., Anderson L. D., Mascoop J. L., Johnstone B. The infrared and radio flux densities of galactic H II regions // *The Astrophysical Journal*. — 2017. — V. 846. Issue 1, article id. 64. — Pp. 21.

37. *Wickramasinghe N. C., Kahn F. D., Mezger P. G.* Interstellar matter // *Saas-Fee Advanced Course 2, Interstellar Matter, given at the Swiss Society for Astronomy and Astrophysics (SSAA), in Les Diablerets, Switzerland.* — 1972. — Pp. 209-342. РеД. Wickramasinghe N. C., Kahn F. D., Mezger P. G.
38. *Poglitsch A., Waelkens C., Geis N.* et al. The photodetector array camera and spectrometer (PACS) on the Herschel Space Observatory // *Astron. and Astrophys.* — 2010. — V. 518, Id. L2. — P. 12.
39. *Griffin M. J., Abergel A., Abreu A.* et al. The Herschel-SPIRE instrument and its in-flight performance // *Astron. and Astrophys.* — 2010. — V. 518, id. L3. — P. 7.
40. *Anderson L. D., Zavagno A., Deharveng L.* et al. The dust properties of bubble H II regions as seen by Herschel // *Astronomy and Astrophysics.* — 2012. — V. 542, id. A10. — P. 27.
41. *Khramtsova M. S., Wiebe D. S., Boley P. A., Pavlyuchenkov Ya. N.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in spatially resolved extragalactic star-forming complexes // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2013. — V. 431. — Pp. 2006–2016.
42. *Draine B. T., Li A.* Infrared emission from interstellar dust. IV. The silicate-graphite-PAH model in the post-Spitzer era // *The Astrophysical Journal.* — 2007. — V. 657. — Pp. 810–837.

Благодарности Автор выражает особую благодарность своему научному руководителю Д. З. Вибе за терпение, помощь и чуткое руководство. Автор благодарен Т. С. Моляровой, Я. Н. Павлюченкову, М. С. Кирсановой и В. В. Акимкину за поддержку, внимательное чтение диссертации, полезные замечания, и соавторам за совместную работу.