

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

УДК 524.523

Топчиева Анастасия Павловна

МОРФОЛОГИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ ИНФРАКРАСНЫХ
КОЛЬЦЕВЫХ ТУМАННОСТЕЙ ВОКРУГ ОБЛАСТЕЙ
ИОНИЗОВАННОГО ВОДОРОДА

01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

д.ф.-м.н. Д.З. Вибе

Москва — 2020

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Морфология ИК кольцевых туманностей	23
1.1 ИК кольцевые туманности (ИККТ)	23
1.2 Отбор ИККТ для рабочего каталога	25
1.2.1 Формирование рабочего каталога по радиоданным на 20 см и излучению на 8 мкм	25
1.2.2 Морфологический анализ изображений ИККТ	26
1.3 Морфологические характеристики избранных ИККТ из ра- бочего каталога	29
1.4 О выборке ИККТ, наиболее подходящих для систематическо- го сравнения результатов наблюдений с данными теоретиче- ских расчётов в 1D приближении	35
1.5 Положения, выносимые на защиту	38
Глава 2. Фотометрический анализ ИК кольцевых туманностей	39
2.1 Данные наблюдений и их обработка	40
2.2 Оценка массовой доли ПАУ в ИККТ	45
2.3 Определение принадлежности ИККТ к областям НП	48
2.4 Сравнение характеристик ИК кольцевых туманностей, полу- ченных по рабочему каталогу и по другим каталогам	55
2.5 Обсуждение и выводы	57
2.6 Положения, выносимые на защиту	59
Глава 3. Определение спектрального класса источника иони-	

зации в ИК кольцевых туманностях	60
3.1 Радиопоток в континууме на длине волны 20 см	61
3.2 Оценка спектральных классов ионизирующих звёзд	62
3.3 Сравнение потоков в радио и ИК диапазонах	65
3.4 Моделирование инфракрасных спектров ИККТ	73
3.5 Положения, выносимые на защиту	76
Заключение	77
Приложение 1	78
Приложение 2	83
Приложение 3	88
Приложение 4	91
Приложение 5	94
Приложение 6	101
Приложение 7	106
Литература	110

Введение

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 [3, 4]. Одним из основных факторов влияния массивных звёзд на МЗС является яркое ультрафиолетовое (УФ) излучение, приводящее к формированию областей ионизованного водорода (HII) [5]. 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 [6–8].

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 НII [5]. Согласно наблюдениям областей НII в среднем ИК и радиодиапазонах их можно разделить на три группы [1]:

1. Гиперкомпактные и ультракомпактные области НII (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 НII, вероятно, представляют собой отдельные объекты с аккреционными дисками. Ультракомпактные области НII представляют собой объекты, где звезда окружена плотным газом, а диска нет.
2. Компактные и классические области НII имеют размеры порядка нескольких парсеков, концентрацию электронов порядка 10^2 см^{-3} . Предполагается, что ионизация таких областей НII может быть вызвана несколькими массивными звёздами.
3. Гигантские области НII: 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 НII, тем она моложе, а с возрастом уменьшается концентрация вещества и увеличивается радиус. Но эволюционные связи между областями НII различных типов пока неясны.

Согласно установившимся представлениям (см., например, [9]), между областью НII 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 [10]. Подобные кольцевые структуры в русскоязычной литературе обычно называют инфракрасными кольцевыми туманностями (ИККТ) [11]. В работе [12] 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 [13] было показано, что 86% объектов из каталога [12] можно классифицировать как области НII, сформировавшиеся вокруг массивной горячей звезды класса О или В, или нескольких таких звёзд. Таким образом, ИККТ можно считать не какими-то самостоятельными объектами, а наблюдаемым проявлением пылевой структуры областей НII 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. [12, 14]). Позднее были созданы каталоги “The WISE Catalog of Galactic HII Regions V2.2”¹⁾ и “Vialactea. The Milky Way as a Star Formation Engine”²⁾ [15, 16], в которые было включено более 8 000 галактических областей НII и кандидатов в ИККТ.

Основу каталога [12, 14] составили изображения на длине волны

¹⁾<http://astro.phys.wvu.edu/wise/>

²⁾<http://vialactea.iaps.inaf.it>

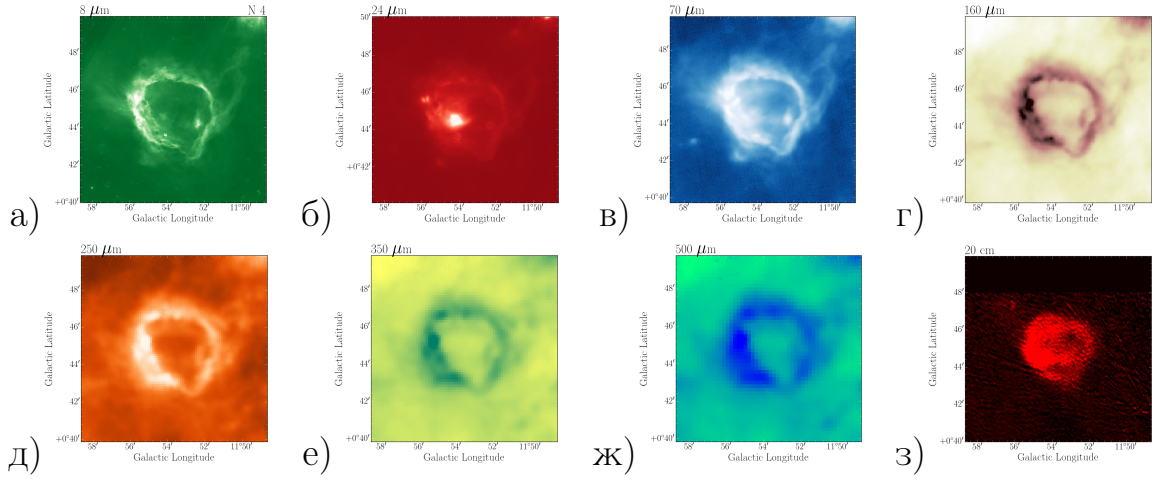


Рис. 0.1. Примеры изображений ИККТ N49 с центром в $l = 28.83^\circ$, $b = -0.23^\circ$: а) 8 мкм, Spitzer, IRAC (зелёный); б) 24 мкм, Spitzer, MIPS (красный); в) 70 мкм, Herschel, PACS (синий); г) 160 мкм, Herschel, PACS (коричневый); д) 250 мкм, Herschel, SPIRE (оранжевый); е) 350 мкм, Herschel, SPIRE (жёлтый); ж) 500 мкм, Herschel, SPIRE (голубой); з) 20 см, VLT, New GPS 20cm (красный).

8 мкм. Однако для кольцевых ИККТ характерна специфическая морфология и на других длинах волн ИК диапазона, что учтено в каталогах [15,16]. Внутри практически всех колец или арок излучения на 8 мкм наблюдается излучение на 24 мкм (см., напр., [17]). 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) [18]. 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 [19]. 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 коль-

цо эмиссии в различных диапазонах, примерно совпадающее с кольцом эмиссии на 8 мкм. Под *внутренней областью* понимается область, находящаяся внутри кольца эмиссии на 8 мкм [20]. С внешним кольцом эмиссии на 8 мкм совпадает также менее яркое кольцо излучения на 24 мкм, но большая 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 (см. примеры на рис. 0.1).

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 НII. Одно из таких исследований проведено в работе [19], где ИККТ моделируется как проявление расширяющейся области НII. Излучение пыли в этой работе рассматривалось с помощью одномерной модели расширяющейся области НII MARION [21]. 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 [22] с использованием модернизированного кода MARION [21]. Был рассмотрен дрейф заряженной пыли под действием давления излучения в области НII. В рамках этой модели стало возможным качественно объяснить внутреннюю кольцевую эмиссию на 24 мкм неоднородным распределением

пылинок различных размеров внутри области III.

В работах [19] и [22] в качестве эталонной рассматривалась область III RCW120. На ИК изображениях она выглядит как практически идеальная окружность [23, 24], 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”) [25]. Практически идеальная правильная форма объекта RCW120 привлекла к нему внимание и других исследователей, строивших динамические модели этой области. Интересно, однако, что согласно некоторым работам [25–27] наблюдаемые характеристики RCW120 всё же для своего объяснения требуют, как минимум, двухмерной гидродинамической модели [28], 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 [26]. В работе [29] 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 разви-

тия 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, [15, 16, 30–35]). 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. [8, 36, 37, 41, 42]).

В данной диссертационной работе соискателем был поставлен ряд целей, достижение которых позволяет углубить наше понимание эволюции пыли в ИККТ (в частности в областях НII), 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.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Число страниц в диссертации 123, рисунков 29, таблиц 7. Список литературы содержит 88 наименований.

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.

Глава 1: Описана методика поиска ИККТ, связанных с областями НII, и процедура составления рабочего каталога ИККТ, содержащего 99 объектов, имеющих выраженную эллипсоидальную или кольцевую фор-

му. 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 HII.

Глава 2: Представлен расчёт полного потока излучения для 99 областей HII, ассоциированных с ИККТ из рабочего каталога. Выборка анализируемых объектов бралась из Главы 1. Использованы 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 [39]; и 250, 350 и 500 мкм — данные с фотометрической камеры SPIRE [40] 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 [41], в которой по показателям цветов определяется принадлежность объектов к областям HII или планетарным туманностям. Также проведено сравнение с результатами [42], где рассчитаны потоки для внегалактических областей HII. Определены спектральные индексы в различных диапазонах, и найден спектральный индекс, который является хорошим индикатором температуры пылевой компоненты.

Получены оценки доли ПАУ (q_{PAH}) и интенсивности УФ излучения в ИККТ по сеткам моделей, предложенным в статье [43]. Рассмотрены данные по ИК и радиопотокам из трёх каталогов областей HII: 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” [8, 15]. Приведено обсуждение того, как различные методы обра-

ботки данных, а также выбор начальных данных, могут повлиять на результаты теоретического анализа областей НII. 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 НII.

Глава 3: Рассчитаны потоки от областей НII 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.

В **Заключении** представлены основные результаты диссертационной работы. Даны рекомендации для дальнейшего развития темы диссертации.

Цели диссертационной работы

1. Составление выборки (рабочего каталога) замкнутых ИККТ, перспективных для сопоставления с результатами одномерного гидродинамического моделирования расширяющихся областей НII.
2. Определение свойств центральных источников излучения и концентрации газа в областях НII.
3. Детальный анализ излучения областей НII и сравнение результатов моделирования с наблюдательными характеристиками излучения ИККТ.

4. Выбор спектрального индекса, который может использоваться для оценки температуры пылевой компоненты.

Задачи

1. Создание рабочего каталога областей НП с замкнутой кольцевой структурой.
2. Исследование морфологии излучения областей НП в различных диапазонах длин волн.
3. Оценка УФ потока в объектах выборки.
4. Оценка спектрального класса центральной звезды и концентрации электронов по излучению в радиодиапазоне.
5. Построение спектральных распределений энергии для объектов выборки и их сравнение с результатами ранее проведённых исследований.
6. Определение спектрального индекса, наиболее подходящего для оценки температуры вещества в ИККТ.

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.

Личный вклад соискателя

Соискатель в равной 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 вещества.

Положения, выносимые на защиту по результатам диссертационной работы

- 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.

- 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.
- Оценена массовая доля ПАУ ($q_{\text{ПАУ}}$) в рассматриваемых ИККТ. Подтверждено теоретическое предсказание о низком содержании ПАУ и мелкой пыли внутри областей НП.
- 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.

Апробация

Основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах и представлены как на российских, так и на зарубежных конференциях и семинарах.

Основные результаты диссертации представлены в устных и стендовых докладах на следующих мероприятиях:

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.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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. // Сборник научных трудов ИНАСАН (Москва 2018 г.). — Москва: Изд-во Янус-К. — 2018. — С. 312–314.
6. 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.

7. Топчиева А. П., Вибе Д. З. Связь галактических областей НII с внегалактическими областями звездообразования // Сборник научных трудов ИНАСАН (Москва 2019 г.). — Москва: Изд-во Янус-К. — 2019. — С. 21–26.
8. Топчиева А. П., Павлюченков Я. Н., Акимкин В. В., Кирсанова М. С. Моделирование инфракрасных спектров областей НII // Сборник научных трудов ИНАСАН (Москва 2019 г.). — Москва: Изд-во Янус-К. — 2019. — С. 15–20.

Глава 1. Морфология ИК кольцевых туманностей

В данной главе представлен рабочий каталог 99 ИККТ, форма которых на 8 мкм и 70 мкм хорошо аппроксимируется эллипсами. В каталоге выделено 32 объекта, форма которых близка к круговой и размеры позволяют различить детали формы (эксцентриситет эллипса, вписанного на 8 мкм, не превышает 0.6, угловой радиус более $20''$). Эти объекты перспективны с точки зрения сопоставления с результатами одномерного гидродинамического моделирования расширяющихся областей НII.

В разделе 1.1 описываются объекты исследования — инфракрасные кольцевые туманности (ИККТ). В разделе 1.2 произведён отбор ИККТ для рабочего каталога и представлен морфологический анализ изображений ИККТ. Результаты посвящён раздел 1.3. Выводы и обсуждение представлены в разделе 1.4. Основные результаты исследования опубликованы в статьях 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; 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.

1.1. ИК кольцевые туманности (ИККТ)

Теоретические расчёты эволюции областей НII проводятся уже более 40 лет [38]. Существуют как трёх- и двухмерные, так и одномерные модели для моделирования этих объектов, учитывающие динамику газа, перенос излучения, магнитное поле, звёздный ветер, химический состав и

размер пыли, динамику пылинок и их движение относительно газа. Например, описание распределения пылевых частиц в области НII представлено в работах [22, 27, 44–47], выметание пыли давлением излучения, а также фоторазрушение пылинок рассмотрены в работе [19], действие звёздного ветра исследовано в работе [26]. Изучение пространственного распределения ИК излучения в областях НII помогает исследовать динамику и разрушение пылинок УФ излучением центральной массивной звезды (или группы таких звёзд). Моделирование областей НII в контексте ИККТ позволяет учитывать множество физических параметров, но результаты расчётов необходимо детально сравнивать с наблюдательными данными. Такая возможность представилась исследователям благодаря масштабному картированию ИК излучения нашей Галактики.

Близ плоскости Галактики наблюдается большое количество ИККТ. В ходе наблюдений на космических ИК телескопах Spitzer, WISE, Akari и Herschel было открыто более 8 000 объектов [8, 12, 14, 15, 41], которые выглядят как замкнутые или разомкнутые кольцевые структуры. Большинство подобных объектов отождествляются с областями НII вокруг массивных звёзд типа О–В [12, 14] или с туманностями вокруг звёзд Вольфа-Райе [48]. Специфической характеристикой изображений является наличие внешнего кольца, видимого в ближнем, среднем и дальнем ИК диапазонах (от 8 до 500 мкм). Эмиссия из внутренней области кольца наблюдается лишь в среднем ИК диапазоне в пределах 24–70 мкм и сравнима с фоновой в ближнем и дальнем ИК. Внутри данных объектов находятся массивные звезды, которые генерируют интенсивное УФ излучение, приводящее к формированию областей ионизованного водорода (НII) с расширяющимися ионизационными и ударными фронтами. Между областью НII и окружающим её газом родительского молекулярного облака существует переходная область — т.н. фотодиссоционная область (ФДО). В ней водород преимущественно нейтрален, но степень ионизации газа составляет примерно 0.01% за счёт

ионизации углерода. Концентрация нагретых газа и пыли в ФДО обычно достаточно высока, поэтому ФДО ярко светят в ИК диапазоне. Различное распределение эмиссии в разных ИК диапазонах предполагает различное пространственное распределение источников соответствующего излучения, то есть пылинок различных типов (разного химического состава, структуры, размеров). Поэтому исследование ИККТ открывает путь к изучению эволюции пылинок в этих объектах.

В данной главе представлена процедура отбора ИККТ, которые могут быть использованы в качестве объектов сравнения для одномерного гидродинамического моделирования областей НП с учётом эволюции пыли.

1.2. Отбор ИККТ для рабочего каталога

1.2.1. Формирование рабочего каталога по радиоданным на 20 см и излучению на 8 мкм

Одним из ключевых признаков принадлежности объекта к областям НП является тормозное излучение горячего газа в ионизованной области, поэтому в основу выделения ИККТ, окружающих области НП, нами был положен обзор New GPS 20cm¹⁾ из базы данных радиоизображений MAGPIS [30] для области в пределах $|b_{\text{gal}}| < 0.8^\circ$ и $5^\circ < l_{\text{gal}} < 48.5^\circ$.

Из этого обзора были выделены компактные источники радиоизлучения, в направлении на которые затем был проведён визуальный поиск кольцевых туманностей на длинах волн 8 и 24 мкм. Для этого были использованы изображения, полученные на камерах телескопа Spitzer IRAC [49] и MIPS [50], соответственно. В итоговый список включались объекты, имеющие вид кольца (возможно, с небольшими разрывами) на длине волны 8 мкм, внутри которых наблюдается ИК излучение на 24 мкм и радиоиз-

¹⁾<http://third.ucllnl.org/gps/>

лучение на 20 см. Кроме того, в предположении о том, что обращенная к наблюдателю часть сферически-симметричной оболочки должна быть оптически толстой в видимом диапазоне, по возможности дополнительно контролировалось отсутствие излучения в линии $H\alpha$, однако найти такие данные удалось не для всех объектов. Общее число отобранных объектов составило 99. Эти объекты включены в рабочий каталог. Для них из архива телескопа Herschel были загружены изображения на длинах волн 70 и 160 мкм с прибора PACS [39] и на 250, 350 и 500 мкм с прибора SPIRE [40]. Шесть объектов выборки (S15, S21, S44, S123, S145, S167, N102 и N121) не попали в обзор New GPS 20cm, но ранее в работе [12] были идентифицированы как ИККТ, связанные с областями III. Они были включены в исследование, так как морфологически они весьма схожи с остальными объектами.

Для анализа морфологии ИК изображений кольцевых туманностей и построения радиальных профилей интенсивности излучения проводилась очистка ИК кадров, взятых из архивов, от точечных источников, поскольку далее предполагалось рассматривать распределение интенсивности излучения внутри этих объектов. Соавтором работы [36] В. В. Крушинским была разработана программа на языке Python для выполнения очистки кадра в этом исследовании, работающая в автоматическом режиме. Поиск и удаление точечных источников осуществлялись в три этапа: на первом этапе удалялись изображения ярких звёзд, затем — изображения звёзд промежуточной яркости и в конце — изображения слабых звёзд.

1.2.2. Морфологический анализ изображений ИККТ

Для приближённого описания морфологии ИККТ, выделенных при помощи визуального поиска, использовалась процедура вписывания эллипсов в изображения. Это позволяет определить положение центра туманности, её размер, степень асимметрии и ориентацию в картинной плоскости.

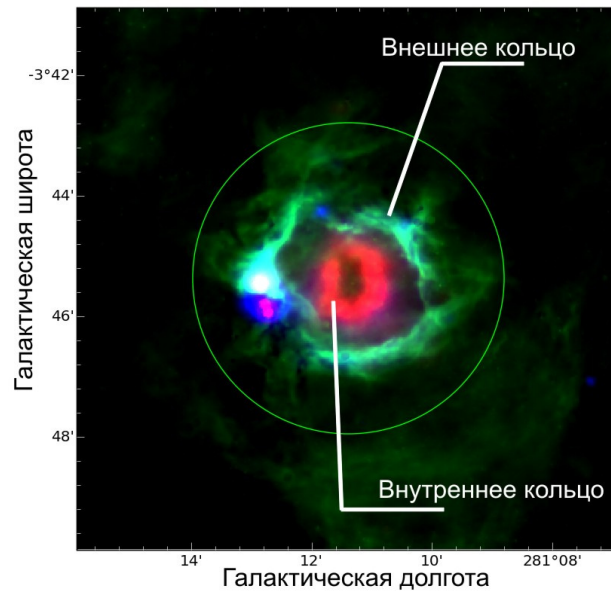


Рис. 1.1. Пример области для определения фотометрического центра объекта N49 из каталога [12]. Зелёным цветом показана эмиссия на 8 мкм, красным — эмиссия на 24 мкм, синим — эмиссия на 70 мкм. Зелёной окружностью ограничена область, использованная для анализа.

Программа для аппроксимации ИК изображений эллипсами была разработана соискателем и использовалась после удаления точечных источников (на 8, 24 и 70 мкм). Работа разделялась на три этапа.

1. Сначала определялся фотометрический центр изображения (x_0, y_0) путем определения “центра масс” интенсивности излучения по всем пикселям в выделенном регионе вокруг объекта (рис. 1.1).
2. От фотометрического центра во всех направлениях проводилось 359 лучей, на которых выбирались координаты пикселей с максимальным значением интенсивности.
3. Полученный контур, окружающий фотометрический центр, аппроксимировался эллипсом при помощи метода наименьших квадратов. В результате находились следующие параметры области: геометрический центр (центр вписанного эллипса), большая и малая полуоси (a, b) и позиционный угол ϕ относительно направления на северный полюс Галактики.

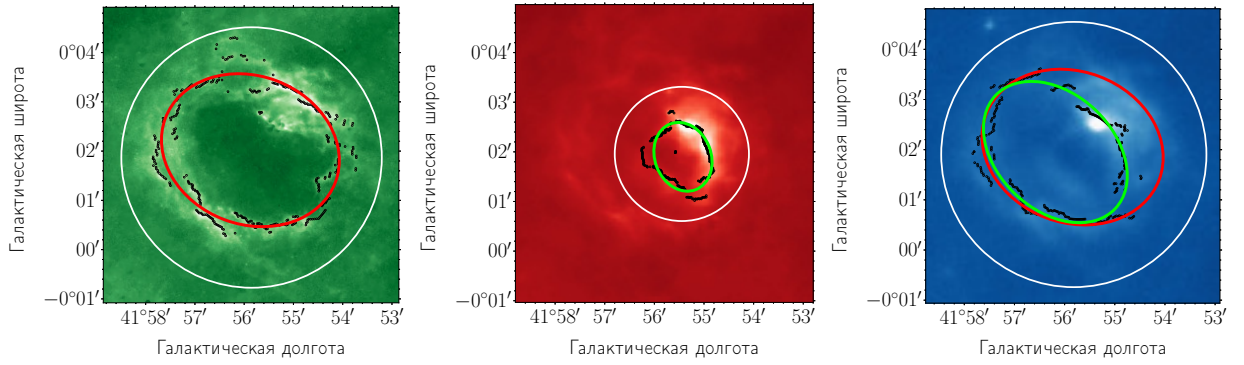


Рис. 1.2. Примеры эллипсов, вписанных в контуры объекта N80 на длинах волн 8 мкм (слева), 24 мкм (в центре) и 70 мкм (справа). На левой и правой панелях красным цветом показан эллипс, вписанный в контур объекта на 8 мкм. Белыми окружностями ограничены области, использованные для анализа. Чёрные точки соответствуют максимуму интенсивности. Зелёный цвет на средней и правой панелях — результат вписывания эллипсов на 24 и 70 мкм, соответственно (одним цветом для разных длин волн).

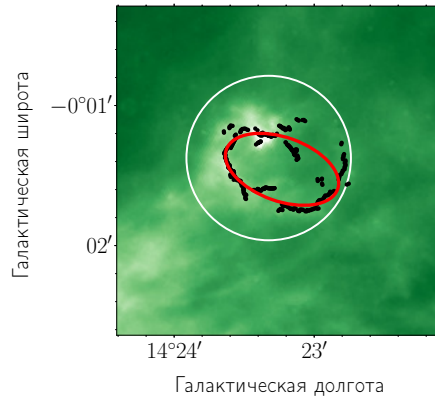


Рис. 1.3. Пример плохого вписывания эллипса в кольцо эмиссии на 8 мкм в объекте MWP1G014390–000200S.

Процедура вписывания эллипсов выполнялась для карт на длинах волн 8, 24 и 70 мкм.

Примеры изображений ИККТ со вписанными эллипсами показаны на рис. 1.2.

Следует отметить, что в ряде случаев из-за плохого разрешения и (или) сложной структуры объекта корректную подгонку эллипса произвести не удалось. Пример показан на рис. 1.3. Формальная ошибка определения полуосей эллипсов составила около $0.1''$, однако с учетом неопределённости прорисовки контура ошибка в определении размеров объекта

оценивалась примерно в $1''$ (с соответствующей ошибкой определения эксцентриситета ~ 0.1).

Процедура выбора контура проводилась таким образом, чтобы на 8 и 70 мкм эллипс вписывался во внешнее кольцо, а на 24 мкм — во внутреннее кольцо (примеры расположения колец показаны на рис. 1.1 для 8 и 70 мкм, а для 24 мкм — на рис. 1.2). Внутреннее кольцо визуально выделяется также на изображениях на длинах волн от 70 до 160 мкм, однако в большинстве объектов интенсивности излучения и (или) угловое разрешение на этих длинах волн недостаточны для автоматизированного анализа. На этих длинах волн морфологию внутреннего кольца необходимо исследовать индивидуально.

В конечном итоге подгонка позволила построить распределения объектов по эксцентриситетам и позиционным углам и проверить возможные корреляции между этими параметрами. Результаты обсуждаются в следующем разделе.

1.3. Морфологические характеристики избранных ИККТ из рабочего каталога

Результаты аппроксимации изображений туманностей на 8 и 70 мкм эллипсами приведены в табл. 1.1 и 1.2 (см. Приложение 1, Приложение 2), соответственно. Прочерки в табл. 1.2 означают, что для данного объекта подгонку провести не удалось, и связано это с тем, что в некоторых объектах на 70 мкм присутствует протяжённая эмиссия и не видно кольцевой структуры. Из отобранных 99 объектов 86 ранее рассматривались в работах [12, 51, 52]. В исследованной области неба выделено четыре новых объекта, в таблицах обозначенные TWKK. Размеры и эксцентриситеты 30 объектов были также определены в каталоге [12]. Они сравнены с результатами наших расчётов на рис. 1.4.

Как видно, размеры оболочек и на 8 мкм, и на 70 мкм хорошо согла-

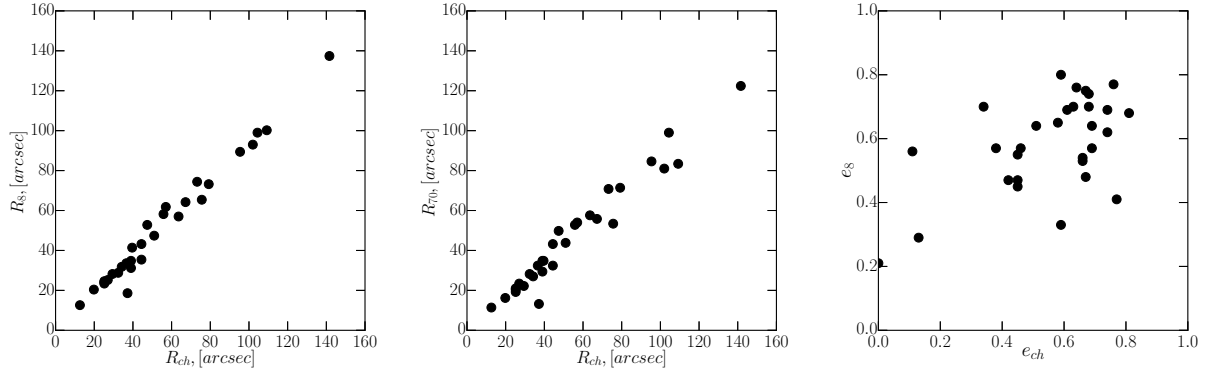


Рис. 1.4. Сравнение результатов расчётов, представленных в данной работе, с результатами из каталога [12] (обозначены нижним индексом “Ch”). Слева — сравнение размеров туманностей, оценённых по изображениям на 8 мкм. В центре — сравнение размеров туманностей, оценённых по изображениям на 70 мкм. Справа — сравнение эксцентриситетов туманностей, оценённых по изображениям на 8 мкм.

суются с прежними оценками (за оценку размера принималась величина $R = \sqrt{ab}$). Ситуация с эксцентриситетами менее определённая: значения e в данном исследовании и в работе [12] не коррелируют друг с другом и имеют значительный разброс, который предположительно связан с большей произвольностью выбора параметров эллипса при его вписывании в объект вручную в работе [12].

На рис. 1.5 сопоставляются размеры и позиционные углы эллипсов на 8 и 70 мкм. Оба параметра хорошо согласуются друг с другом, что указывает на единую физическую природу оболочек, излучающих на этих длинах волн. Распределение эллипсов на 8 и 70 мкм по позиционным углам является практически равномерным (см. рис. 1.6), что говорит об отсутствии предпочтительной ориентации кольцевых туманностей (её можно было бы ожидать при наличии в исследованной ограниченной области неба каких-либо крупномасштабных структур). Среднее относительное различие в положениях центров эллипсов составляет примерно $(0.1 - 0.2)R_8$, где R_8 — размер объекта в излучении на 8 мкм. Большие значения, как правило, характерны для объектов сложной морфологии или компактных объектов,

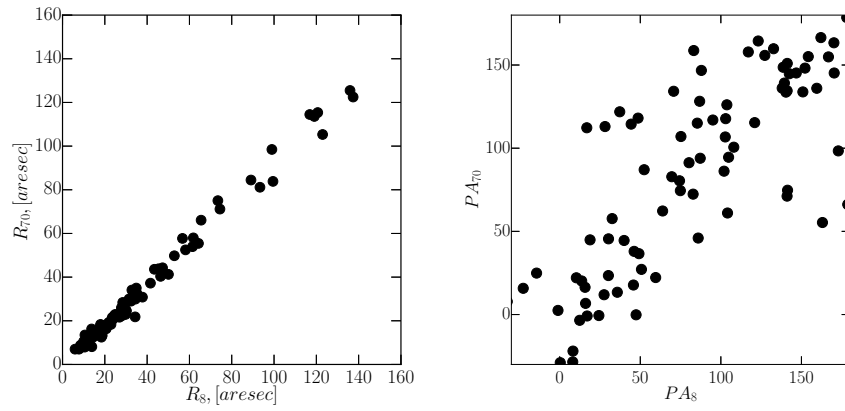


Рис. 1.5. Сравнение размеров (слева) и позиционных углов (справа) для эллипсов на 8 и 70 мкм.

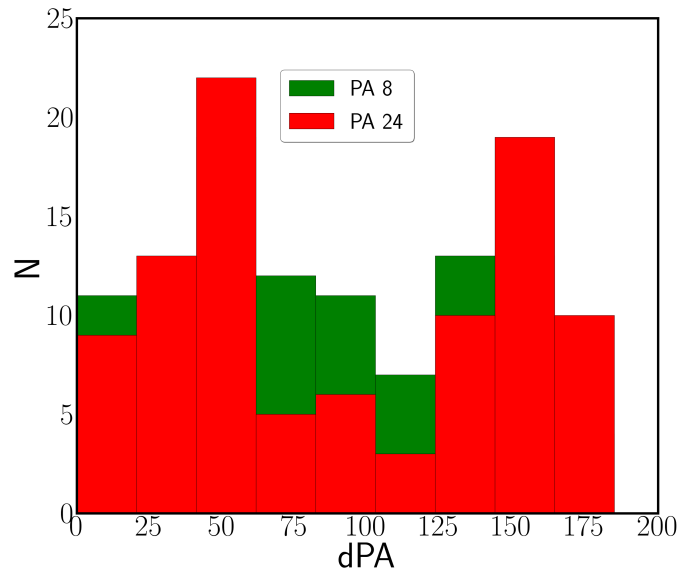


Рис. 1.6. Распределение объектов на 8 и 70 мкм по позиционным углам.

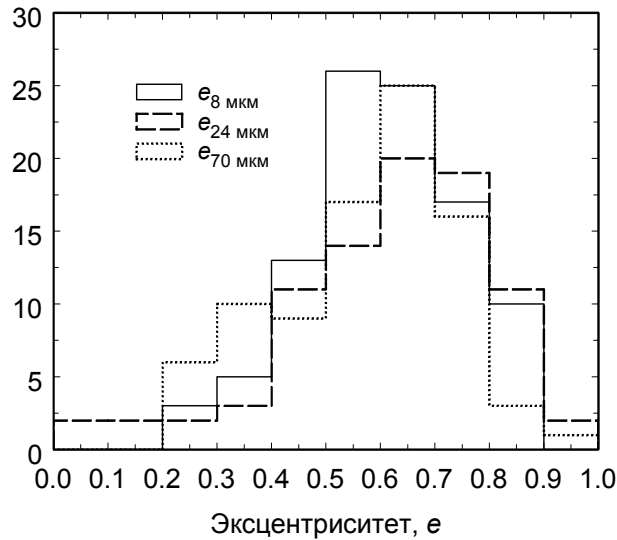


Рис. 1.7. Распределение объектов по эксцентриситетам.

структура которых на 70 мкм определяется плохо.

Распределение объектов по эксцентриситетам вписанных эллипсов на 8, 24 и 70 мкм показано на рис. 1.7. Примерно для половины объектов величина e не превышает 0.6 (это медианное значение эксцентриситета для 8 и 24 мкм), что с учётом неопределённости выделения оболочки позволяет считать их форму близкой к круговой. Следует отметить, что самые большие значения эксцентриситетов отражают не вытянутую форму оболочки, а её неправильную структуру: большой эксцентриситет сочетается со значительным расхождением в положениях центров эллипсов на 8 и 70 мкм, что также подчёркивает сложность структуры объекта.

Результаты вписывания эллипсов в карты излучения на 24 мкм заслуживают отдельного обсуждения. Как уже говорилось, процедура вписывания проводилась таким образом, чтобы эллипсы на 24 мкм описывали внутреннюю эмиссию (по отношению к оболочке на 8 мкм). Сильная неоднородность этой эмиссии приводит к тому, что параметры эллипса лишь в некоторых случаях отражают её реальную структуру (как, например, на средней панели рис. 1.2). На рис. 1.7 видно, что некоторые эллипсы на 24 мкм имеют эксцентриситеты менее 0.2. Все эти эллипсы имеют очень

небольшой размер (по сравнению с R_8), а их центры значительно смещены относительно центров эллипсов на 8 и 70 мкм. Такой результат вписывания эллипса, вероятно, соответствует ситуации, когда на внутреннем кольце выделяется очень яркий пик, а остальная часть кольца теряется на общем фоне. Эллипсы с большими эксцентриситетами, центры которых почти совпадают с центрами внешних эллипсов, соответствуют незамкнутым внутренним кольцам. Даже в тех случаях, когда внутреннее кольцо замкнуто, его ориентация может сильно отличаться от ориентации внешнего кольца. Например, в объекте N80 позиционные углы эллипсов на 8 и 24 мкм отличаются на 36° , хотя оба кольца практически идеально замкнуты.

Помимо аппроксимации изображений эллипсами также были построены радиальные профили интенсивности излучения туманностей на 8 и 24 мкм в 359 направлениях от центра эллипса для каждого объекта. Примеры профилей для объекта N80, показанного ранее на рис. 1.2, приведены на рис. 1.8, где профили для разных позиционных углов обозначены красными точками. Также на рис. 1.8 показаны радиальные профили, усреднённые по всей периферии. Они могут быть использованы для сравнения с результатами численного моделирования.

Профили интенсивности излучения на 8 и 24 мкм даны с одинаковым масштабом по вертикальной оси, чтобы подчеркнуть значительное превышение эмиссии внутреннего кольца на 24 мкм над эмиссией внешнего кольца как на 8 мкм, так и на 24 мкм. В объекте N80 внешние кольца на всех трёх длинах волн имеют почти одинаковый средний размер, в других объектах они могут быть немного смещены друг относительно друга. Интересно отметить, что внутреннее кольцо эмиссии на 70 мкм, расположенное примерно там же, где и кольцо на 24 мкм. Такое внутреннее кольцо в длинноволновых диапазонах ($\lambda \geq 70$ мкм) наблюдается и в других объектах. В тех немногочисленных случаях, когда морфология объекта достаточно

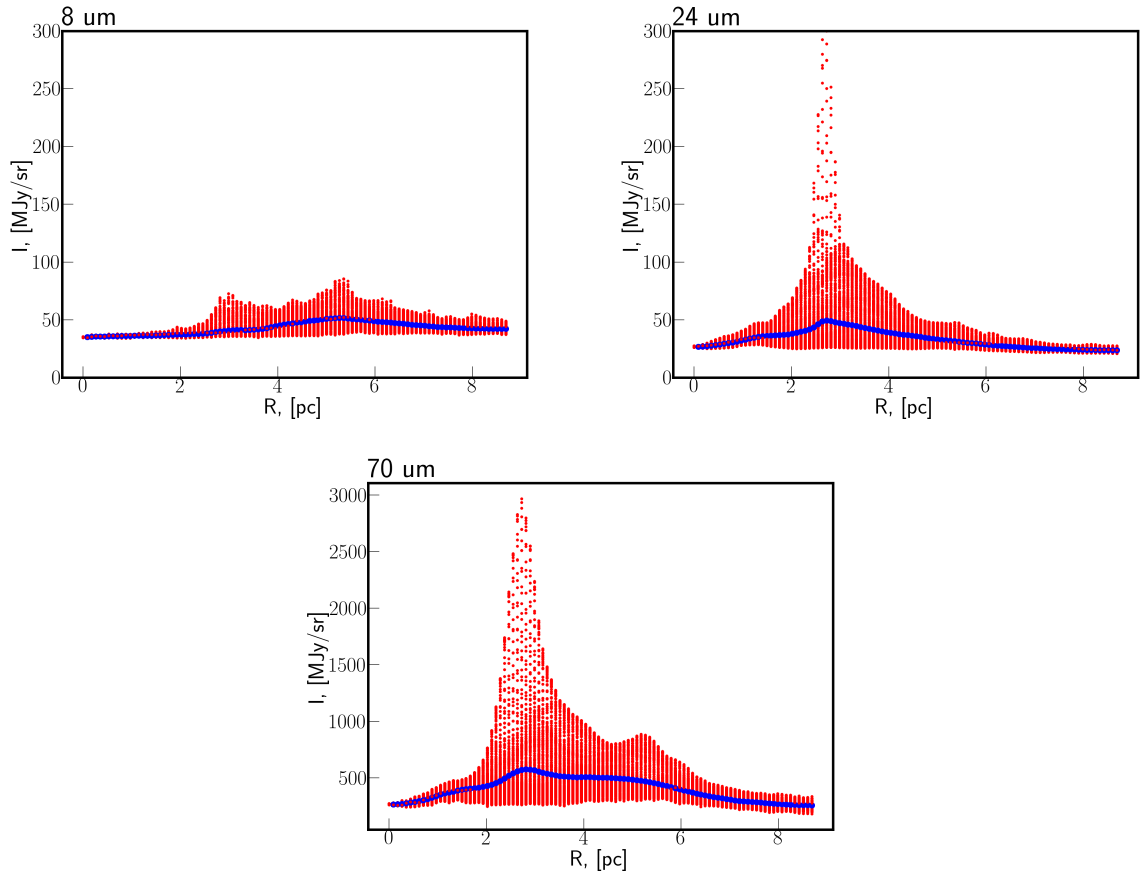


Рис. 1.8. Радиальные профили интенсивности излучения в объекте N80 на 8, 24 и 70 мкм. Показаны наборы профилей интенсивности для 359 направлений (красные точки) и профиль интенсивности, усредненный по азимуту (синие линии). Интенсивность излучения измеряется в МЯн/стер, по оси x отложено расстояние от найденного геометрического центра.

регулярна и хорошо разрешена, создается впечатление, что кольцо эмиссии на 24 мкм идёт по внутренней кромке кольца эмиссии на 70 мкм.

Сравнение размеров эллипсов ($R = \sqrt{ab}$) на 8 и 24 мкм показывает, что для объектов выборки среднее отношение R_8/R_{24} составляет около 2.5. Максимальное же значение этого отношения превышает 40, что в реальности соответствует не кольцу, а центральному пику излучения на 24 мкм. Это согласуется с результатами теоретического моделирования ИК излучения от областей НII [19], согласно которому ПАУ излучают из ФДО вокруг области НII на 8 мкм, в то время как излучение на 24 мкм производят, по видимому, более крупные углистые пылинки, способные выжить внутри области НII. Имеется также несколько объектов, у которых размер эллипса на 24 мкм лишь незначительно уступает размеру эллипса на 8 мкм; такое соотношение размеров соответствует ситуации, когда кольцо на 24 мкм непосредственно примыкает к внутренней границе кольца на 8 мкм. Во всех случаях максимальная интенсивность внутренней эмиссии на 24 и 70 мкм существенно превосходит максимальную интенсивность излучения внешнего кольца на 8 мкм. Причины различия размеров и их соотношений являются одним из вопросов, ответы на которые должны быть получены при помощи моделирования. Можно предположить, что различные относительные размеры колец (центральных пиков) на 24 мкм в различных объектах являются отражением различных возрастов.

1.4. О выборке ИККТ, наиболее подходящих для систематического сравнения результатов наблюдений с данными теоретических расчётов в 1D приближении

В литературе для обозначения ИККТ широко используется термин “инфракрасный пузырь” (infrared bubble), означающий, что эти туманности являются проекциями структур, имеющими *примерно* сферическую симметричную форму. Однако при этом не прекращается дискуссия о том,

не являются ли некоторые из них в действительности кольцами, то есть двухмерными структурами. Такие кольца (или торы) могли бы возникать вокруг горячей звезды, находящейся внутри относительно тонкого молекулярного слоя [53]. Против этого предположения выдвигается следующее возражение: если бы кольцевые туманности образовывались в тонких слоях, мы должны были бы наблюдать их не только “плашмя”, но и “с ребра”, в виде биполярных туманностей или некоторых промежуточных форм, образующихся в результате прорыва расширяющейся зоны НII по обе стороны от слоя, причём таких объектов должно быть большинство. Подобные объекты действительно наблюдаются [54], однако имеющейся статистики недостаточно, чтобы выяснить, насколько они распространены и связаны с кольцевыми туманностями.

Пролить свет на природу кольцевых туманностей могут статистические исследования их параметров. Такое исследование было, в частности, представлено в работе [55], в которой ИК туманности анализировались по данным наблюдений на телескопах Spitzer и AKARI на длинах волн от 8 мкм до 160 мкм. Авторы классифицировали объекты по типам (замкнутое кольцо, разомкнутое кольцо, неклассифицируемый объект), а также исследовали соотношения между радиусами, светимостями и отношениями светимостей в различных диапазонах. Было показано, что в свойствах ИККТ всех морфологических типов имеются общие черты, но исключение составляют крупные области с разомкнутыми внешними кольцами и высокой полной ИК светимостью. По мнению авторов, происхождение таких туманностей может быть связано со столкновением газо-пылевых облаков.

Подобные объяснения предлагались для туманности RCW49 [56] и даже для “идеального пузыря” RCW120 [29]. Указанием на возможное прошлое столкновение служит наличие связанных с инфракрасной туманностью молекулярных облаков с разными лучевыми скоростями. Большая разница скоростей (около $15 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$) двух облаков указывает, что они не

могут быть гравитационно связаны. Эти факты свидетельствуют о формировании массивных ионизирующих звёзд в этих областях и говорят о том, что структура вещества вокруг них может быть инициирована столкновением двух облаков. Пример RCW120 показывает, что атрибутом структуры, образовавшейся в результате столкновения газопылевых облаков, необязательно является иррегулярная разомкнутая форма. Тем не менее, скорее всего, в большинстве случаев признаком прошлого столкновения следует считать несимметричность и разомкнутость инфракрасной оболочки.

Основной целью создания выборки объектов был отбор ИККТ, которые могут быть пригодны для сравнения с результатами одномерного численного моделирования. Иными словами, требуются объекты не слишком вытянутой формы (за предельное значение эксцентриситета принято $e = 0.6$ для вписанного эллипса на 8 мкм), представляющие собой не кольца, а оболочки. Свидетельством в пользу оболочечной структуры по крайней мере некоторых объектов можно считать отсутствие эмиссии в Н α . Численное моделирование, выполненное в работе [19], показывает, что оптическая толщина передней стенки сферически-симметричной оболочки ИККТ в видимом диапазоне составляет как минимум несколько десятков. Таких перспективных объектов в выборке оказалось 47. Однако у некоторых из них небольшой эксцентриситет отражает не симметричность формы, а недостаточное угловое разрешение (даже на 8 мкм) для определения детальной структуры. При введении дополнительного ограничения $R_8 > 20''$ (десятикратное угловое разрешение на 8 мкм) тестовых объектов останется 32, чего достаточно для систематического сравнения результатов наблюдений с данными теоретических расчётов.

У половины объектов эксцентриситет вписанного эллипса на 8 мкм превышает 0.6, что свидетельствует либо о сильной вытянутости объекта, либо о том, что его внешняя оболочка существенно разорвана (и эллипс, фактически, был вписан в некоторый сегмент оболочки). Такие искажен-

ные оболочки могут возникать и при расширении области НП в относительно тонком молекулярном слое или в сильно неоднородном облаке, и при столкновении облаков. Во всех подобных случаях судить о природе оболочки невозможно без детальных дополнительных наблюдений и без привлечения трёхмерного численного моделирования.

1.5. Положения, выносимые на защиту

По результатам первой главы на защиту выносится следующее положение:

- 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.

Глава 2. Фотометрический анализ избранных ИК кольцевых туманностей

В данной главе диссертационной работы представлен детальный фотометрический анализ ИККТ из рабочего каталога.

Как уже говорилось в предыдущей главе, ИККТ обладают простой, на первый взгляд, морфологией, для которой характерны внешнее кольцо на 8 мкм и внутренняя эмиссия на 20 см. Их можно наблюдать во всей плоскости Галактики, и они являются характерным признаком наличия массивных звёзд спектральных классов О–В. Наличие большого объёма данных в ИК диапазоне с космических телескопов Spitzer, Herschel, WISE и Planck, а также радиоданных с наземного радиотелескопа VLA позволяет заложить основу для сравнения и анализа наблюдательных характеристик ИККТ с теоретическими моделями. В частности, многими исследователями проводились оценки плотности, температуры, концентрации пыли различных размеров по излучению на разных длинах волн, изучалось спектральное распределение энергии на периферии и во всём объекте исследования (см. [8, 15, 20, 36]). Одним из преимуществ этих данных является возможность интерпретировать эволюцию как самой области НII (ИККТ), так и источника ионизирующего излучения.

В этой главе приведены оценки полных потоков ИК излучения и потоков от внешней и внутренних частей ИККТ, определены спектральные индексы и выявлен спектральный индекс, наиболее подходящий для оценки температуры пыли. Произведена оценка массовой доли ПАУ по сеткам моделей из работы [43], а также сопоставлены данные для 33 ИККТ, которые присутствуют в трёх каталогах: в каталоге представленном в работе

Топчиева и др.2017 [20], “The WISE Catalog of Galactic HII Regions V2.2”¹⁾ и “Vialactea. The Milky Way as a Star Formation Engine”²⁾. Анализируются причины различий данных по потокам в разных каталогах.

В разделе 2.1 представлены наблюдательные данные и их обработка, рассчитаны потоки излучения от внешней и внутренней частей объекта и суммарный поток от объекта. В разделе 2.2 дана оценка массовой доли ПАУ ($q_{\text{РАН}}$) по сеткам моделей, предложенным в статье [43]. Анализу этих результатов посвящен раздел 2.3. В разделе 2.4 проводится сравнение спектральных распределений энергии ИККТ с результатами других работ, а также определяются спектральные индексы. Обсуждение и выводы представлены в разделе 2.5. Основные результаты исследования опубликованы в статье 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 и частично опубликованы в работе Topchieva A., Akimkin V., Grigorii Smirnov-Pinchukov G. Infrared photometric properties of inner and outer parts of HII regions // Research in Astronomy and Astrophys. — 2019. — V.19, article id. 148.

2.1. Данные наблюдений и их обработка

В предыдущей главе было выделено 32 “идеальных” ИККТ. Для этой выборки объектов в данной главе мы определили потоки на семи длинах волн в диапазоне от 8 до 500 мкм как для внешней, так и для внутренней части области НII. Для этого анализа конволюция результатов наблюдений не проводилась, так как нам необходимо было сохранить структуру кольца и внутренней части объекта для более четко прослеживания структуры.

Чтобы определить значения потока в автоматическом режиме, была использована следующая процедура: типичная ширина внешних колец

¹⁾<http://astro.phys.wvu.edu/wise/>

²⁾<http://vialactea.iaps.inaf.it>

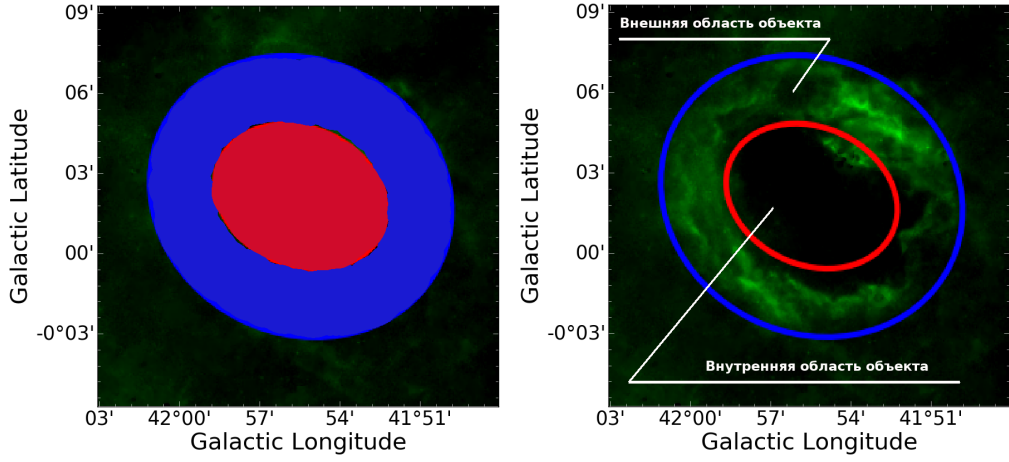


Рис. 2.1. Слева: пример апертур для расчёта потока от внешней (синяя зона) и внутренней (красная зона) областей. Справа: границы зон показаны на изображении объекта N80. Зелёным цветом представлено излучение на 8 мкм.

в ближнем ИК диапазоне составляет 20 – 50% от радиуса всего объекта, поэтому для расчёта внутренней апертуры эллипса большая полуось определялась, как $a_{\text{inn}} = 0.7a$, а малая как $b_{\text{inn}} = 0.7b$. Этот выбор позволяет исключить большую часть излучения с боковой стороны оболочки, но, безусловно, не излучение, возможно, исходящее от передней и задней стенок в случае трёхмерной морфологии. Внешняя апертура лежит между внутренней апертурой и эллипсом, где $a_{\text{out}} = 1.3a$, а $b_{\text{out}} = 1.3b$. Пример такого выбора апертуры для объекта N80 представлен на рис. 2.1.

Для всех длин волн (8, 24, 70, 160, 250, 350 и 500 мкм) для данного объекта использовалась одна и та же апертура, которая определяется для каждого объекта индивидуально, как описано выше. Использовались потоки на 8 и 24 мкм, полученные на камерах телескопа Spitzer IRAC [49] и MIPS [50], соответственно. Потоки на длинах волн 70 и 160 мкм получены при помощи прибора PACS [39], а данные на 250, 350 и 500 мкм — при помощи прибора SPIRE [40]. Потоки от внутренней и внешней частей объектов, а также телесные углы объектов представлены в табл. 2.1 и 2.2 (Приложение 3 и Приложение 4, соответственно). Разделив потоки на соответствующие телесные углы, можно получить среднюю интенсивность во

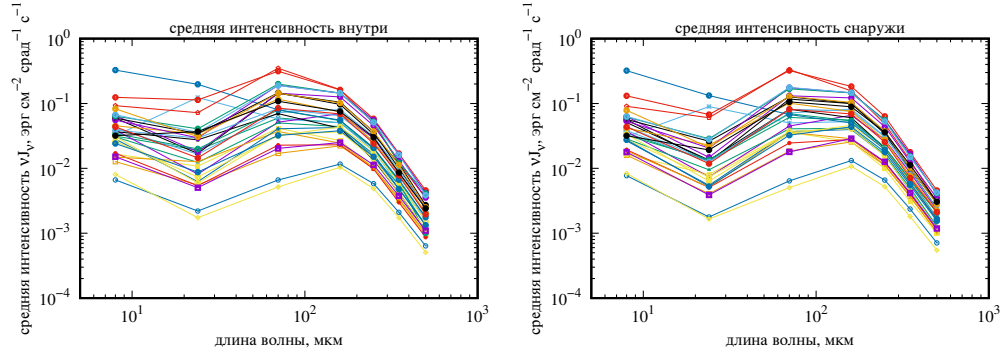


Рис. 2.2. Спектральное распределение энергии от внутренней (слева) и внешней (справа) областей 32 ИККТ.

внутренней и внешней областях ИККТ. Это позволяет представить спектральное распределение энергии (spectral energy distribution — далее по тексту будет использовано английское сокращение SED) единым образом для всех 32 объектов. Для внутренней и внешней областей SED представлены на рис. 2.2. Их характерной особенностью является наличие двух компонент: излучение от холодных и крупных пылинок, достигающее пика примерно на 100 мкм, и излучение стохастически нагретой пыли, ПАУ и очень мелких пылинок в ближнем ИК.

Для количественной оценки характеристики SED была использована формула для расчёта спектрального индекса для двух соседних частот из используемого нами набора данных:

$$\alpha_{12} = \log(I_1/I_2) / \log(\nu_1/\nu_2).$$

Сравнение спектральных индексов во внутренней и внешней областях представлено на рис. 2.3.

Ошибка, представленная на рис. 2.3, рассчитывается в предположении фиксированного значения относительной ошибки определения потоков, равного 15%. Горизонтальная линия на графике показывает положение одинаковых значений спектральных индексов во внутренней и внешней областях ИККТ. Можно заметить, что спектральные индексы,

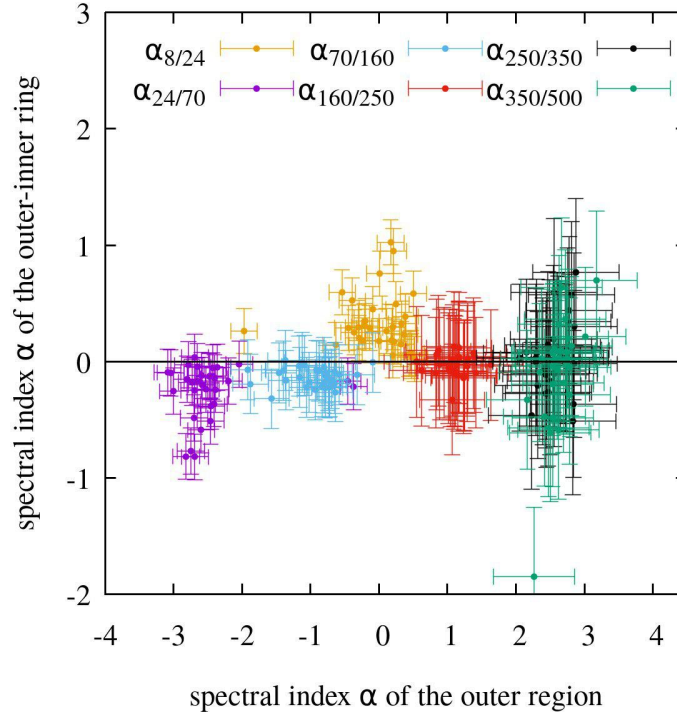


Рис. 2.3. Связь между спектральными индексами во внутренней и внешней областях для 32 ИККТ. Горизонтальная линия представляет собой равные значения спектральных индексов во внутренней и внешней частях ИККТ.

рассчитанные между 160 и 250 мкм, 250 и 350 мкм и 350 и 500 мкм ($\alpha_{160/250}$, $\alpha_{250/350}$, $\alpha_{350/500}$), очень похожи как во внешней, так и во внутренней частях. Это можно объяснить двумя причинами. Во-первых, пространственное разрешение на этих длинах волн может быть недостаточным для разрешения структуры ИККТ (наличие внешнего и внутреннего кольца). Во-вторых, в излучении на этих длинах волн, вероятно, преобладает излучение от внешней оболочки, и, в случае сферической морфологии, внутренняя апертура охватывает в основном излучение с передней и задней стороны объекта, а не из ионизованной окрестности центральной звезды.

Спектральные индексы $\alpha_{8/24}$, $\alpha_{24/70}$, $\alpha_{70/160}$ чётко различают внутреннюю и внешнюю части ИККТ. Если точки на рис. 2.3 лежат выше диагональной линии, это означает, что в кольце преобладает излучение на коротких длинах волн, а если ниже, то спектральный индекс выше во внутренней части объекта. На 8 мкм вклад в излучение дают в основном ПАУ, на 24

мкм — крупная горячая или мелкая стохастически нагретая пыль. Спектральный индекс $\alpha_{8/24}$ не информативен в отношении температуры пыли, но отражает распределение плотности ПАУ и крупной горячей пыли.

Что касается индексов $\alpha_{24/70}$, $\alpha_{70/160}$, все точки лежат под чёрной линией, что говорит о том, что излучение приходит в основном от оболочки. Так как излучение на 24 мкм приходит как от мелкой стохастически нагретой пыли, так и от крупной горячей пыли, то $\alpha_{24/70}$ сложно использовать как индикатор температуры пыли, а вот $\alpha_{70/160}$ может являться хорошим индикатором температуры, так как в этом диапазоне в основном светит крупная и холодная пыль. Это делает $\alpha_{70/160}$ лучшим индикатором температуры пыли в областях НП, имеющих форму ИККТ. Следует отметить, что в литературе для определения температуры пыли в подобных объектах часто используется подгонка SED модифицированным чернотельным излучением. В этом случае необходимо использовать данные на нескольких длинах волн, включая длины волн приёмника SPIRE (до 500 мкм). Поскольку угловое разрешение изображений в этом диапазоне телескопа Herschel существенно ниже, этот метод приемлем для объектов большого углового размера или в тех случаях, когда структурой можно пренебречь. Как показывают наши результаты, в других ситуациях достаточно использовать всего два диапазона с приемлемым угловым разрешением.

Для иллюстрации зависимости спектрального индекса $\alpha_{70/160}$ от температуры пыли мы воспользуемся выражением, описывающим так называемое модифицированное чернотельное излучение $I_\nu = (1 - e^{-\tau_\nu})B_\nu(T)$. Здесь $B_\nu(T)$ — функция Планка для данной температуры пыли, а τ_ν — оптическая толщина. Соответствующий спектральный индекс определялся по формуле:

$$\alpha = 3 - \frac{x}{1 - e^{-x}} + \frac{\tau_\nu}{e^{\tau_\nu} - 1}\beta, \quad (2.1)$$

где $x = h\nu/(k_B T)$ и $\beta = d \log \kappa_\nu / d \log \nu$ — индекс непрозрачности, характеризующий спектральные свойства коэффициента непрозрачности пыли κ_ν ,

$\text{см}^2 \text{ г}^{-1}$. Для расчёта κ_ν использовались оптические свойства силикатных и углистых пылинок из работы [46], но с другим распределением пылинок по размерам. В данной работе использовано степенное распределение пылинок по размеру с показателем степени -3.5 , размерами пылинок от 0.005 до 0.25 мкм и массовым отношением углистых пылинок к силикатным $0.2:0.8$. Соответствующие спектральные индексы $\alpha_{70/160}$ и $\alpha_{160/250}$ для случаев оптически тонкого и толстого излучения представлены на рис. 2.4.

Горизонтальная пунктирная линия показывает значение спектрального индекса в приближении Рэлея-Джинса $\alpha = 2$ в оптически толстых средах (соответствующий предел в оптически тонком случае $\alpha = 2 + \beta$). Отметим, что α монотонно увеличивается с температурой. Наблюдаемые значения $\alpha_{70/160}$ лежат между -2 и 0 , что соответствует температурному диапазону $20 - 30$ К. Внутренние значения $\alpha_{70/160}$ заметно больше, чем внешние, что указывает на более тёплые внутренние области. Однако разница между ними довольно мала и соответствует разнице температур меньше, чем несколько кельвинов. Учитывая градиент температуры между ионизованной областью и нейтральной оболочкой, следует ожидать гораздо большей разности температур. Таким образом, можно сделать вывод о трёхмерной морфологии, которой соответствует значительный вклад оболочки в излучение во внутренней апертуре. Для восстановления свойств пыли внутри областей НП необходим более детальный подход.

Определение температуры пыли по $\alpha_{70/160}$ выполнялось соавтором работы [80] В.В. Акимкиным, и поэтому эти результаты не включены в положения, выносимые диссертантом на защиту.

2.2. Оценка массовой доли ПАУ в ИККТ

В данном разделе приводятся оценки массовой доли ПАУ $q_{\text{ПАУ}}$ (относительно полной массы пыли), полученные нами с использованием моделей из [43].

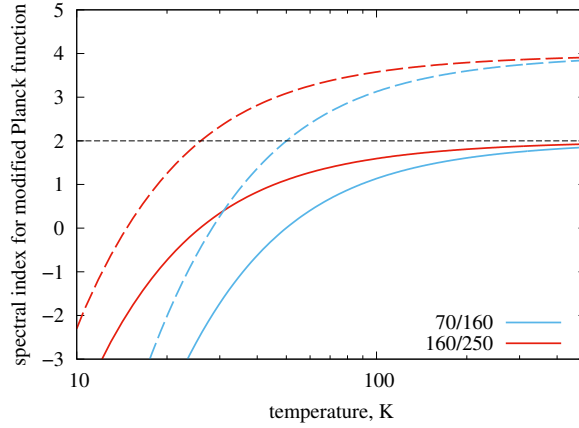


Рис. 2.4. Спектральные индексы α для модифицированного выражения, описывающего излучение абсолютно чёрного тела: $\alpha_{70/160}$ показан синим цветом и $\alpha_{160/250}$ — красным цветом. Сплошными и пунктирными линиями показаны оптически толстые и оптически тонкие случаи, соответственно.

В работе [43] показано, что подавляющее большинство галактик имеют $q_{\text{РАУ}}$ более 2% (рис. 21 в статье [63]) с медианным значением около 3.5%. То есть нормальным можно считать значение $q_{\text{РАУ}} = 3.5\% \pm 1.5\%$. Один из важных вопросов, для ответа на которые необходимы тщательные оценки $q_{\text{РАУ}}$ с максимально детальным пространственным разрешением, состоит в объяснении пониженного содержания ПАУ в галактических ИККТ, что требует детального изучения свойств и эволюции пыли в данных объектах [60, 61]. Второй вопрос связан с использованием излучения ПАУ в качестве индикатора скорости звездообразования, поскольку их излучение поддерживается поглощаемыми УФ фотонами, а УФ фотоны производятся в основном молодыми массивными звёздами. Принято считать, что интенсивность ИК излучения ПАУ пропорциональна локальной скорости звездообразования [81]. Однако исследование фотодиссоциационных областей, то есть регионов, где химия и тепловой баланс определяются фотопроцессами, показывает, что УФ фотоны не только нагревают пыль и заставляют её светиться в ИК диапазоне, но также разрушают наиболее мелкие частицы (ПАУ) [82]. Таким образом, связь между скоростью генерации УФ фотонов и интенсивностью излучения областей звездообразования в ИК диапазоне

может быть достаточно сложной. Оценка $q_{\text{РАН}}$ в ИК туманностях помогает понять, какая доля ПАУ разрушается и какая доля ПАУ дает вклад в излучение ФДО. В частности, небольшое значение $q_{\text{РАН}}$ может указывать, что ПАУ разрушаются в областях НII [60, 61]. Отметим также, что эволюция ПАУ в областях звездообразования важна в контексте общей эволюции органического вещества во Вселенной.

В работе [43] представлен метод определения $q_{\text{РАН}}$ и УФ поля излучения по фотометрическим данным в инфракрасном диапазоне. Её авторы используют потоки на 8, 24, 70 и 160 мкм для определения параметров $P_{7.9}$, P_{24} и R_{71} по формулам:

$$P_{7.9} \equiv \frac{\langle \nu F_{\nu}^{\text{ns}} \rangle_{7.9}}{\langle \nu F_{\nu} \rangle_{71} + \langle \nu F_{\nu} \rangle_{160}}, \quad (2.2)$$

$$P_{24} \equiv \frac{\langle \nu F_{\nu}^{\text{ns}} \rangle_{24}}{\langle \nu F_{\nu} \rangle_{71} + \langle \nu F_{\nu} \rangle_{160}}, \quad (2.3)$$

$$R_{71} \equiv \frac{\langle \nu F_{\nu} \rangle_{71}}{\langle \nu F_{\nu} \rangle_{160}}, \quad (2.4)$$

Формулы 2.2 и 2.4 позволяют рассчитать параметры, необходимые для оценки $q_{\text{РАН}}$, а формулы 2.3 и 2.4 — для оценки УФ поля излучения. Затем с помощью рис. 20 и 21 из работы [43] мы оцениваем значения $q_{\text{РАН}}$ и U методом интерполяции.

Модельная сетка из работы [43] может быть использована для определения интенсивности УФ-поля в областях НII, значение U выражено в единицах средней интенсивности межзвёздного поля излучения в солнечной окрестности, оценка которого была получена в работе [83]. В формализме работы [43] предполагается, что поле излучения рассматриваемой области состоит из двух компонент: минимальное поле излучения с интенсивностью U_{min} и повышенное поле излучения с интенсивностью U , значение которого распределено по степенному закону между U_{min} и некоторым

максимальным значением $U_{\max}$.

Здесь рассматривается упрощённая ситуация изолированной области НП, поэтому предполагается, что существует единственное значение интенсивности излучения, $U_{\min}$ (другими словами, $U_{\max} = U_{\min}$), и в дальнейшем соискатель обозначает его просто U . Это второй важный параметр (помимо $q_{\text{РАН}}$), поскольку ультрафиолетовые фотоны — важная составляющая, определяющая тепловой баланс и динамическую эволюцию вещества как внутри области НП, так и на её границе, где расположена ФДО. Оба параметра связаны друг с другом, поскольку УФ-фотоны разрушают ПАУ и возбуждают их, так что они могут генерировать полосы ИК-излучения. Кроме того, в ФДО примерно 0.1–1% УФ-фотонов поглощается пылью и ПАУ и порождают сверхтепловые (~ 1 эВ) фотоэлектроны, которые вносят вклад в нагрев газа [82,84], поэтому оценка $q_{\text{РАН}}$ необходима для оценки вклада ПАУ в тепловой баланс в этих областях. Результаты представлены в следующем разделе.

2.3. Определение принадлежности ИККТ к областям НП

В предыдущих разделах мы полагали, что все ИККТ ассоциированы с областями НП. Это справедливо для подготовленной нами выборки из 32-х ИККТ, но не обязательно соблюдается в целом. Здесь мы рассмотрим вопрос о степени ассоциированности ИККТ и областей НП более подробно. Для анализа данных используется рабочий каталог, представленный в Главе 1. Чтобы понять, какого размера пыль дает вклад в излучение на той или иной длине волны, используются карты ИК излучения. Принято считать, что на 8 мкм преобладает излучение ПАУ (см. [57]). Что касается 24 мкм, то в этом диапазоне излучают очень мелкие пылинки (very small grains, VSG), подверженные стохастическому нагреву, а также более крупные горячие пылинки (см. [58]). В работе [13] показано, что примерно половина мелкой пыли прослеживается во внутренней части ИККТ на

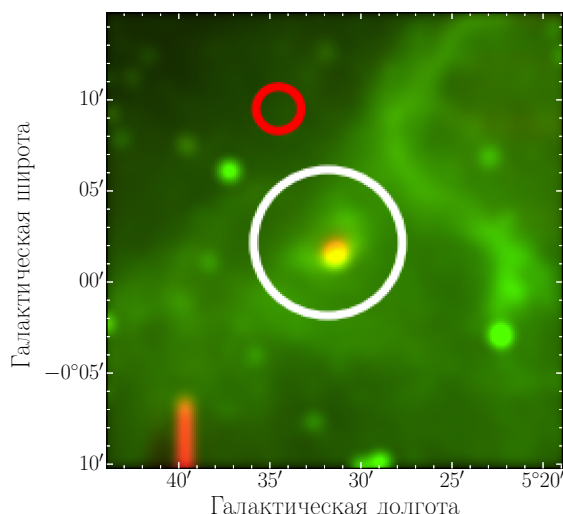


Рис. 2.5. Расположение апертуры источника и фона на 8 мкм, для объекта CN67 (белый круг — апертура источника; красный круг — апертура для оценки фона).

24 мкм. Особенностью пыли, излучающей на 70 и 160 мкм, является то, что она включает в себя как мелкие, так и крупные пылинки [58]. На 250, 350 и 500 мкм излучение почти полностью связано с крупными пылинками. Предполагается, что на длинных волнах (250, 350 и 500 мкм) отделить излучение от фона сложно (см. [41]), но тем не менее для полноты мы используем эти диапазоны в расчётах.

Прежде чем оценить потоки излучения от ИККТ на различных длинах волн, карты излучения во всех диапазонах длин волн приводились к одному разрешению (масштабу). Для этого применялся метод свертки (convolution) с использованием готовых ядер из работы [59]. Размер и положение апертуры источника определялись по излучению на 8 мкм на основании данных, представленных в предыдущей главе. Размер апертуры для оценки фона зависит от размера участка с низким потоком вне объекта выборки (см. рис. 2.5). Размеры апертур как для фона, так и для источника определялись по излучению на 8 мкм, а затем использовались и для всех остальных диапазонов (24, 70, 160, 250, 350 и 500 мкм) .

Далее при помощи разработанных соискателем программ рассчиты-

вались полные потоки излучения от источника. Полный поток определялся как с учётом фона, так и без учёта фона, чтобы выяснить, насколько использованная процедура оценки фона влияет на полученные результаты. Помимо определения полных потоков излучения, исходящего от ИККТ, рассматривались также отношения потоков $[F_{24}/F_8]$, $[F_{70}/F_{24}]$, $[F_{160}/F_{24}]$, $[F_{160}/F_{70}]$. Результаты сравнивались с критериями, выявленными в работе [41], и результатами из работы [42].

Эти шаги необходимы, поскольку при незначительном угловом размере область НП, связанную с молодой массивной звездой (или звёздами), можно спутать с другими объектами, в частности, с планетарными туманностями. В работе [41] предложены критерии, позволяющие в такой ситуации при помощи ИК цветов отличить планетарную туманность от области НП, в центре которой находится молодая массивная звезда. Кроме того, существуют области НП вокруг звёзд Вольфа-Райе, но они в работе [41] не рассматриваются. Сравнение с результатами работы [42] интересно в контексте сравнения пространственно-неразрешённых внегалактических комплексов НП с пространственно-разрешёнными областями НП в нашей Галактике.

Проведённые расчеты (табл. 2.3, Приложение 5) для длин волн от 8 до 500 мкм показывают, что форма спектрального распределения энергии меняется в объекте от зоны внутренней части до зоны кольца. Спектральные распределения для большинства ИККТ имеют характерную форму — повышение интенсивности на 70 и 160 мкм и плавное понижение к 500 мкм. Но есть и отличия: например, объекты TWKK2, MWP1G034088+004405 и MWP1G018580+003400S показывают плоские профили, что указывает на наличие более тёплой пыли. У объектов MWP1G024019+001902, S15 и MWP1G018743+002521 наблюдается снижение интенсивности на 250 мкм, что, возможно, связано с некорректным вычитанием фона в диапазоне длин волн 250, 350 и 500 мкм (см. [41]). Этот эффект также может иметь и

физический смысл (см. рис. 2.6). Зелёными треугольниками на рис. 2.6 показаны данные по потокам от 8 до 500 мкм без вычитания фона, а чёрной линией — с вычетом фона. Видно, что учёт фона почти не сказывается на результатах, есть только небольшие отличия на 500 мкм, которые связаны с протяженной эмиссией рядом с источником. Возможно, что более детальное моделирование ИККТ поможет найти ответ на вопрос о природе этих отличий.

В первой колонке табл. 2.3 (Приложение 5) указан номер строки, во второй — название объекта, в третьей и четвёртой колонках даны галактические координаты объекта, с пятой по седьмую колонку — полный поток от объекта в МЯн на различных длинах волн, в восьмой колонке содержится оценка массовой доли ПАУ в процентах, в девятой колонке дана безразмерная интенсивность излучения в УФ диапазоне (U), также рассчитанная по сеткам моделей, предложенным в работе [43].

Из таблицы видно, что практически всем объектам соответствует оценка $q_{\text{РАН}} \approx 0.47\%$, кроме N14, N51 и MWP1G03080+001100S, что существенно ниже типичного значения 3.5% , приведённого выше. Как говорилось ранее, такие результаты согласуются с тем, что ПАУ разрушаются в ИККТ [60,61]. Что касается интенсивности излучения в УФ диапазоне U , то она варьируется от 1 до 10 в единицах диффузного межзвездного поля в солнечной окрестности. Эти значения ниже, чем ожидается для близких окрестностей массивной звезды. Однако они определены по эмиссии в дальнем ИК диапазоне, которая в наших объектах приходит от внешнего кольца, расположенного далеко от центральной звезды. Более детальную картину можно получить, если проанализировать радиальные вариации SED. Данные в табл. 2.3 представлены с учётом поправок, которые описываются в разделе 2.4 данной главы.

Помимо собственно потоков мы рассматривали также показатели цвета $[F_{24}/F_8]$, $[F_{70}/F_{24}]$, $[F_{160}/F_{24}]$, $[F_{160}/F_{70}]$ и сравнивали их с критериями

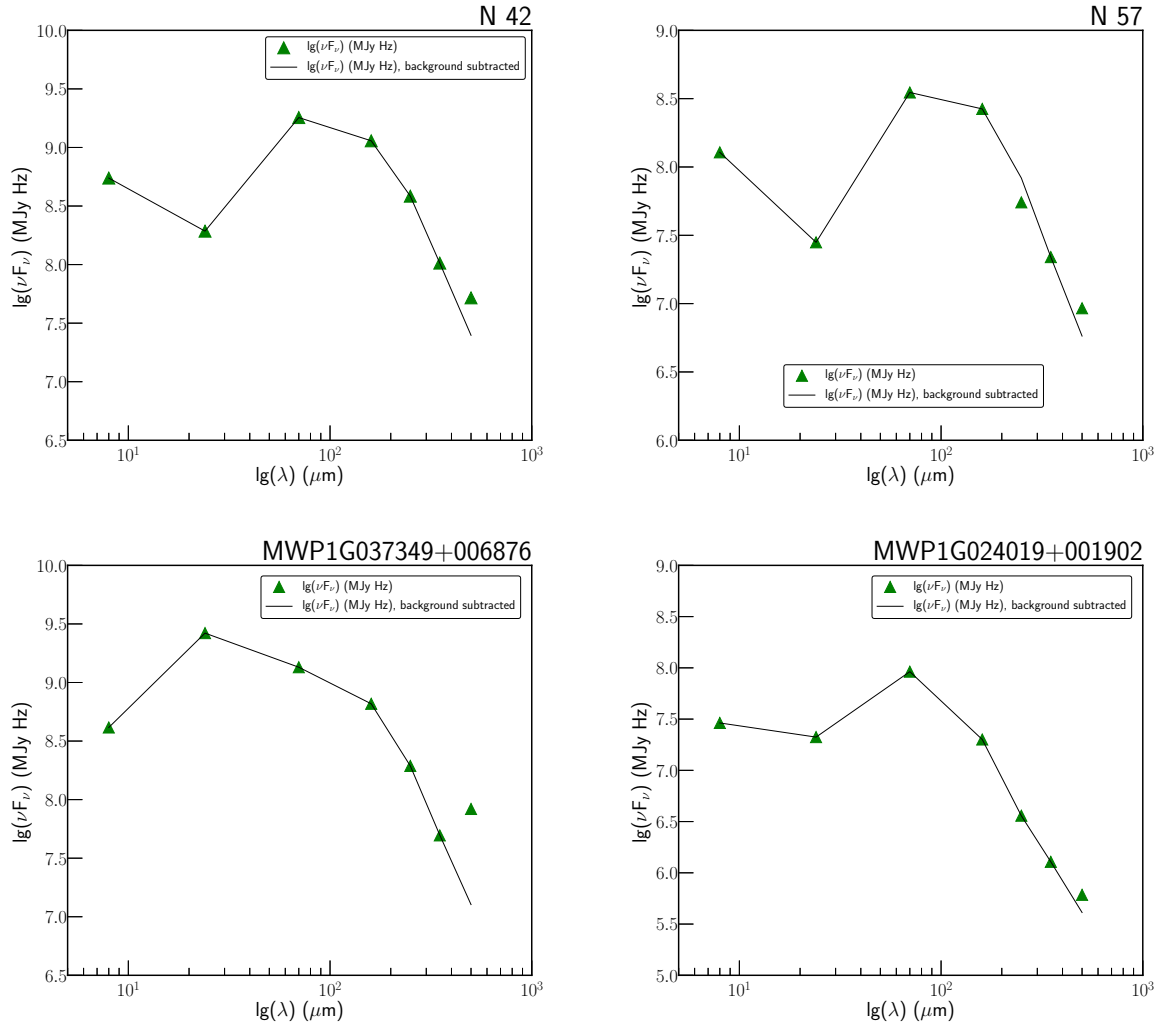


Рис. 2.6. Спектральные распределения энергии на длинах волн от 8 до 500 мкм для объектов N42, N57, MWP1G037349+006876, MWP1G024019+001902. Зелёными треугольниками показаны данные по потокам от 8 до 500 мкм без вычитания фона, а чёрной линией с вычетом фона.

из работы [41], в которой по показателям цветов определяется принадлежность объектов к областям НII или планетарным туманностям. Также проведено сравнение с результатами [42], где рассчитаны потоки для внегалактических областей НII. Суть критерия для отнесения объекта к областям НII, предложенного в работе [41], состоит в том, что если выполняются условия: $[F_{24}/F_8] < 1.0$, $[F_{70}/F_{24}] > 0.8$, $[F_{160}/F_{24}] > 0.8$ и $[F_{160}/F_{70}] > -0.2$, то объекты принадлежат к областям НII, а если это не так, то к планетарным туманностям. Критерий принадлежности объекта к областям НII выделен вертикальными линиями на рис. 2.7, на котором показаны статистические сведения об отношениях потоков на различных длинах волн для набора ИККТ.

Как видно из рис. 2.7, большая часть объектов как из диссертации, так и из работы [42] согласно критериям [41] относятся к областям НII, однако имеются и объекты, которые выходят за границу, предложенную в [41]. Это может быть связано с тем, что в выборке [41] присутствуют объекты, у которых плохо разрешается морфологическая структура. В результате в оценку потоков могла внести значимый вклад протяжённая эмиссия за пределами внешнего кольца. При этом переоценка потока на 24 мкм будет минимальной, так как максимум излучения на 24 мкм приходится на внутреннюю область. В нашей же выборке 32 объекта из 99 объектов можно наблюдать подробную морфологию и более качественно отделить ИККТ от общего фона, который присутствует в кадре. Другое объяснение выхода некоторых наших объектов за пределы критериев [41] может состоять в их более сложной морфологии, которая затрудняет оценку потоков. Важно отметить, что на разных длинах волн критериям [41] не соответствуют разные объекты из нашей выборки. Мы считали, что объект принадлежит к областям НII, если для него выполнялись хотя бы три критерия из четырёх.

Мы также сравнили наши данные с работой [42] для внегалакти-

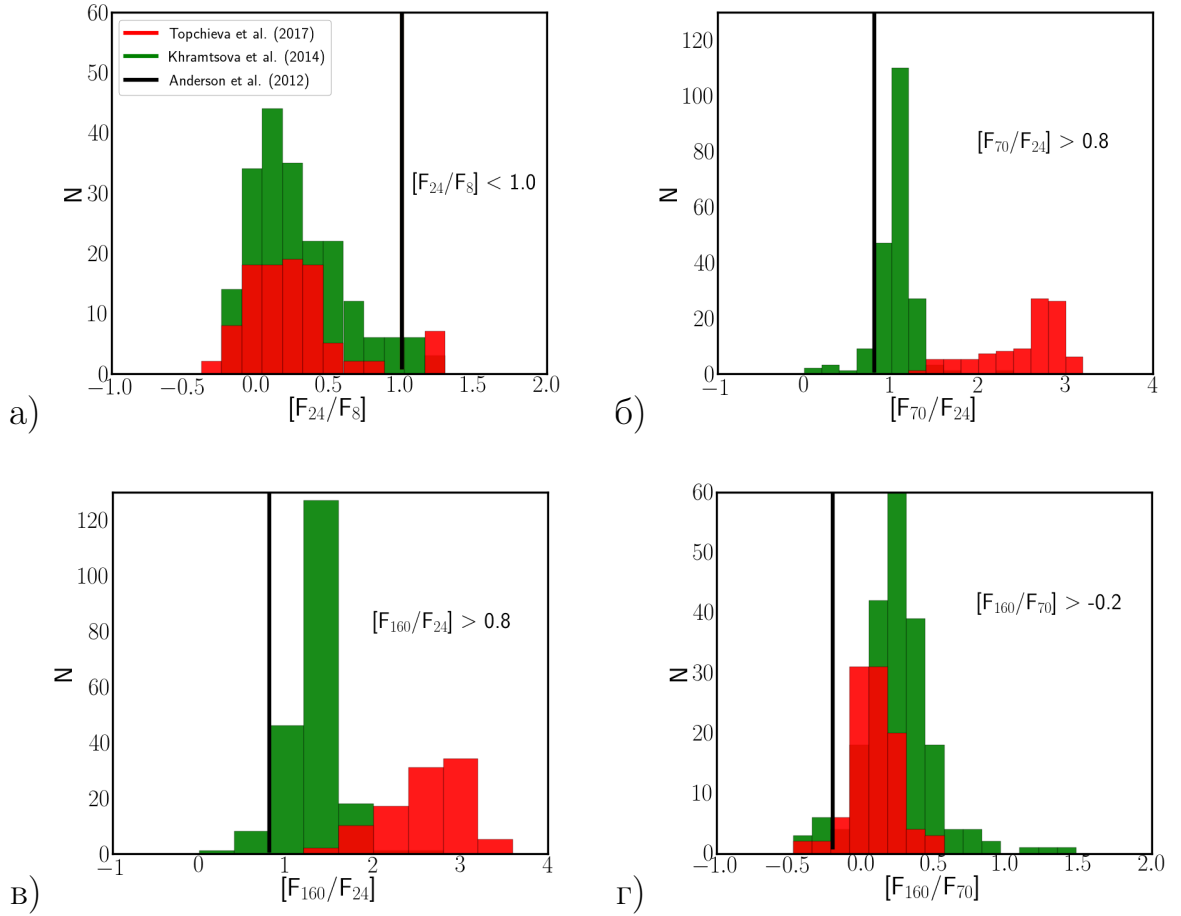


Рис. 2.7. Показатели цвета ИККТ. Зелёным цветом показаны данные для внегалактических зон НII [42], красным цветом — данные для 99 объектов, представленных в Главе 1; вертикальными линиями — границы между областями НII и планетарными туманностями согласно [41]. а) $[F_{24}/F_8]$; б) $[F_{70}/F_{24}]$; в) $[F_{160}/F_{24}]$; г) $[F_{160}/F_{70}]$.

ческих объектов, и обнаружили отличия в показателях цвета $[F_{70}/F_{24}]$ (рис. 2.7б) и $[F_{160}/F_{24}]$ (рис. 2.7в). У объектов из нашей выборки они оказываются существенно выше, чем в работе [42]. Эти отличия вызваны применением разных процедур вычитания фона: в диссертации используется метод определения потоков для протяжённых источников, а в работе [42] — процедура для точечного источника, поскольку внегалактические объекты пространственно не разрешимы в данной работе.

2.4. Сравнение характеристик ИК кольцевых туманностей, полученных по рабочему каталогу и по другим каталогам

Для проверки наших результатов мы сопоставили их с результатами для объектов, общих для нашего каталога и для каталогов [15] и [16]. Таких объектов оказалось 33. Прежде чем перейти к детальному анализу, отметим, что обработка данных, которая использовалась для определения потоков от ИККТ, в данной работе и в работах [15, 16], проводилась по-разному, так как у них применялся метод машинного обучения.

На рис. 2.8 приводятся спектральные распределения энергии (SED) для объекта N80 на длинах волн 8 мкм, 12 мкм, 22, 24, 70, 160, 250, 350 и 500 мкм, 3, 20 и 21 см. Слева показаны SED по данным из каталогов “The WISE Catalog of Galactic HII Regions V2.2”¹⁾ (далее в подписях к картинкам используется обозначение V2.2) и “Vialactea. The Milky Way as a Star Formation Engine”²⁾, а также SED, построенные соискателем. Во всех трёх случаях использовался один и тот же архив данных телескопа Herschel — HiGAL³⁾. Как видно, на длинах волн от 70 до 500 мкм различия между каталогами практически отсутствуют. Интересно отметить, что в данных из каталогов “The WISE Catalog of Galactic HII Regions V2.2” и “Vialactea. The Milky Way as a Star Formation Engine” есть отличия на 22 мкм и 24

¹⁾<http://astro.phys.wvu.edu/wise/>

²⁾<http://vialactea.iaps.inaf.it>

³⁾<https://tools.ssdc.asi.it/HiGAL.jsp>

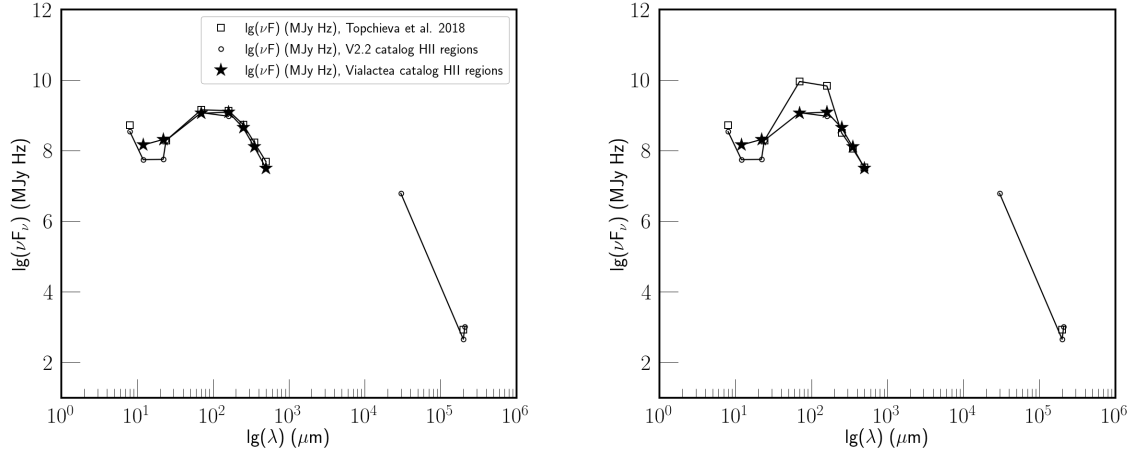


Рис. 2.8. Спектральное распределение энергии в объекте N80. SED из каталогов “The WISE Catalog of Galactic HII Regions V2.2” (далее в подписях используется обозначение V2.2) и “Vialactea. The Milky Way as a Star Formation Engine” сравниваются с SED, построенными в данной работе по данным наблюдений Herschel из архива HiGAL (слева) и из архива IRSA (справа).

мкм, хотя по теоретическим моделям излучение пыли на 22 мкм и 24 мкм не должно отличаться более чем на $< 0.01\%$, и, следовательно, такого провала не должно наблюдаться (см. [43, 62]).

Справа на рис. 2.8 данные каталогов “The WISE Catalog of Galactic HII Regions V2.2” и “Vialactea. The Milky Way as a Star Formation Engine” сравниваются с данными космического телескопа Herschel, выложенными в другом архиве — IRSA. Интересно, что данные на 250 мкм, 350 мкм и 500 мкм практически идентичны, но на длинах волн 70 и 160 мкм наблюдается существенное расхождение. Есть предположение, что анализ фона для данных на 70 и 160 мкм из архива IRSA требует иного подхода, отличного от методики, использованной автором. Применение иных подходов к анализу данных из архива IRAS выходит за рамки диссертационной работы.

Радиоизлучение может быть использовано для оценки потока УФ квантов, расстояния и спектрального класса ионизирующего источника излучения. Как видно из рис. 2.8, радиоизлучение на 20 см хорошо согласуется с данными каталога “The WISE Catalog of Galactic HII Regions V2.2”.

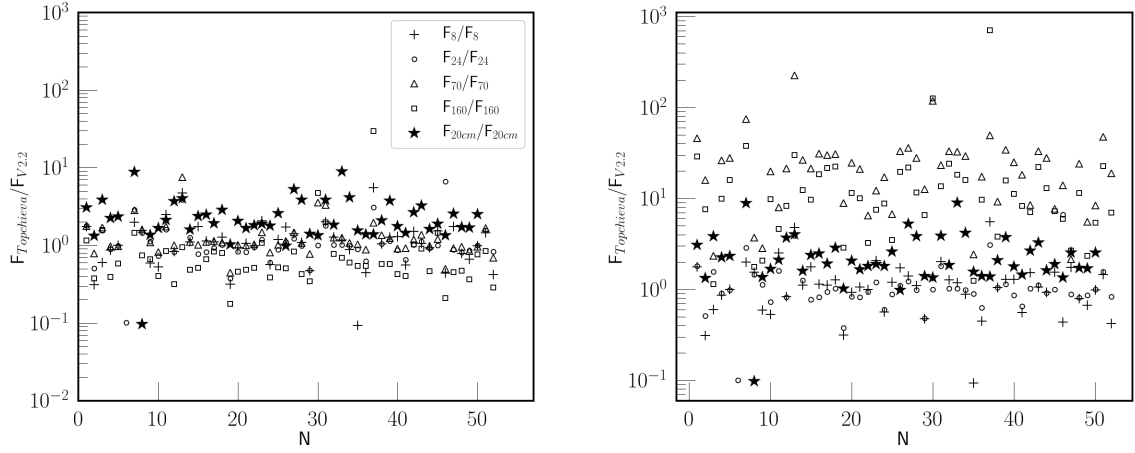


Рис. 2.9. Отношения потоков на различных длинах волн из каталога, представленного в диссертации, и каталога “The WISE Catalog of Galactic HII Regions V2.2”. Слева — данные наблюдений Herschel из архива HiGAL, справа — данные из архива IRSA.

На рис. 2.9 показаны отношения потоков на всех рассмотренных длинах волн для 52 ИККТ из “The WISE Catalog of Galactic HII Regions V2.2” и [20]. Так как в каталог “Vialactea. The Milky Way as a Star Formation Engine” входит всего 21 объект, хорошо совпадающий с нашими данными (как, например, N80, показанный на рис. 2.8), в данном разделе они не представлены. Как и на рис. 2.7, здесь представлены отношения потоков излучения для двух архивов данных космического телескопа Herschel, демонстрирующие большое различие в значениях на 70 мкм и 160 мкм.

В целом, можно заметить, что для большинства объектов различие невелико, вопрос остается открытым только для 70 мкм и 160 мкм. Эти данные важны для оценки доли ПАУ по сеткам моделей [63], но пересчёт по новым данным не сказался на выводах о том, что доля ПАУ в ИККТ очень низка.

2.5. Обсуждение и выводы

В данной главе рассмотрены данные по потокам излучения от ИККТ из трёх каталогов. Построены спектральные распределения энергии, ко-

торые могут учитываться при интерпретации и моделировании данных о составе пыли и газа в этих объектах. Проведены оценки массовой доли ПАУ и значения УФ потока с учётом новых данных (см. Приложение 3). Посчитаны спектральные индексы для соседних длин волн в 32 объектах выборки, чтобы проследить разницу в физических условиях внутри и снаружи ионизованных областей. Используя данные о потоках в 32 объектах, мы показали, что их морфология скорее сферическая, чем плоская. Наклон между 70 и 160 мкм является наиболее подходящим индикатором температуры пыли во внешней оболочке. Более высокое отношение интенсивности от 8 до 24 мкм связано с меньшей интенсивностью излучения в среднем ИК диапазоне, что указывает на то, что ПАУ действительно могут образовываться из-за разрушения более крупной пыли. Эти данные важны для последующего теоретического моделирования и изучения эволюции пыли в областях HII и их оболочках.

Важно отметить, что недостатки в обработке данных могут внести существенный вклад в оценку массовой доли ПАУ по сеткам моделей, предложенным в работе [63]. Неопределённости в потоках излучения на 70 мкм, 160 мкм, 12 мкм и 22 мкм могут повлиять на оценку количества мелкой пыли и ПАУ при сравнении химико-динамических моделей с наблюдениями. Для этого следует использовать как можно большее число спектральных карт. Тем не менее, несмотря на все трудности, обработка данных в ИК диапазоне вышла на уровень количественного сопоставления результатов (см., напр., [16]), а также численного моделирования данных областей (см., напр., [46]). Дальнейший анализ, обработка данных и сравнение их с теоретическими моделями являются незаменимым инструментом понимания формирования ИККТ и их источника ионизации.

2.6. Положения, выносимые на защиту

По результатам второй главы на защиту выносятся следующие положения:

- 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.
- Оценена массовая доля ПАУ ($q_{\text{ПАУ}}$) в рассматриваемых ИККТ. Подтверждено теоретическое предсказание о низком содержании ПАУ и мелкой пыли внутри областей НП.

Глава 3. Определение спектрального класса источника ионизации в ИК кольцевых туманностях

В данной главе определены потоки в радиоконтинууме на длине волны 20 см в направлении на 91 ИККТ из каталога, представленного в Главе 1. Сделаны оценки спектральных классов ионизирующих звезд в 42 областях, для которых известны оценки расстояний. Полученные эффективные температуры объектов выборки лежат в интервале от 28 000 до 39 000 К. Рассмотрена зависимость потоков в ИК диапазоне на длинах волн 8 мкм, 24 мкм и 160 мкм от потока на 20 см. Потоки в ИК диапазоне используются для диагностики нагретого вещества, а поток в радиодиапазоне — для определения количества ионизирующих квантов. Установлено, что значения потоков в ИК диапазоне приблизительно линейно растут с увеличением потока в радиодиапазоне. Представлены исследования зависимости ИК спектра излучения рассматриваемого объема ИККТ от расстояния до звезды и содержания полициклических ароматических углеводородов (ПАУ-частиц) в общей массе пыли. Также представлены результаты моделирования ИК излучения на основе химико-динамической моделей MARION и NATALY для ИККТ.

В разделе 3.1 определяются радиопотоки в континууме на длине волны 20 см. В разделе 3.2 представлены оценки спектральных классов ионизирующих звёзд. В разделе 3.3 проведены сравнения потоков в радио и ИК диапазонах. Моделирование ИККТ представлено в разделе 3.4. Результаты исследования опубликованы в статье Топчиева А. П., Кирсанова М. С., Соболев А. М. // *Астрономический журнал*. — 2018. — Т. 62, № 11 — С. 764–773, а также частично опубликованы в работе Topchieva A., Akimkin V.,

Grigorii Smirnov-Pinchukov G. Infrared photometric properties of inner and outer parts of HII regions // Research in Astronomy and Astrophys. — 2019. — V 19, article id. 148.

3.1. Радиопоток в континууме на длине волны 20 см

В данной главе рассчитаны потоки излучения от 91 ИККТ в радиодиапазоне на длине волны 20 см (F_{20}), данные по которым приведены в обзоре New GPS 20 см¹⁾. Как говорилось в Главе 1, всего нами отобрано 99 объектов. Разницу составляют восемь объектов (S15, S21, S44, S123, S145, S167, N102 и N121), которые не попали в обзор New GPS 20см, но были включены в наш каталог, поскольку ранее в работе [12] были идентифицированы как ИККТ, связанные с областями HII.

Для расчёта потоков на всех длинах волн использовались апертуры, определённые по излучению на 8 мкм (см. Главу 1). На рис. 3.1 на примере объекта N49 показана апертура источника, использованная для определения радиопотока. Изображение на длине волны 20 см взято из базы данных радиоизображений MAGPIS [30].

Для определения спектрального класса ионизирующих звёзд по величине потока в радиоконтинууме необходимо знать расстояния до объектов. Для данного исследования соискатель не определял расстояния сам, а воспользовался данными каталогов областей HII, прежде всего каталогом [8], в котором на основе ИК данных каталогизировано более 8 000 объектов. Кроме того, использовались оценки расстояний из работ [12, 14]. Всего оценки расстояний имеются для 42 объектов.

¹⁾<http://third.ucllnl.org/gps/>

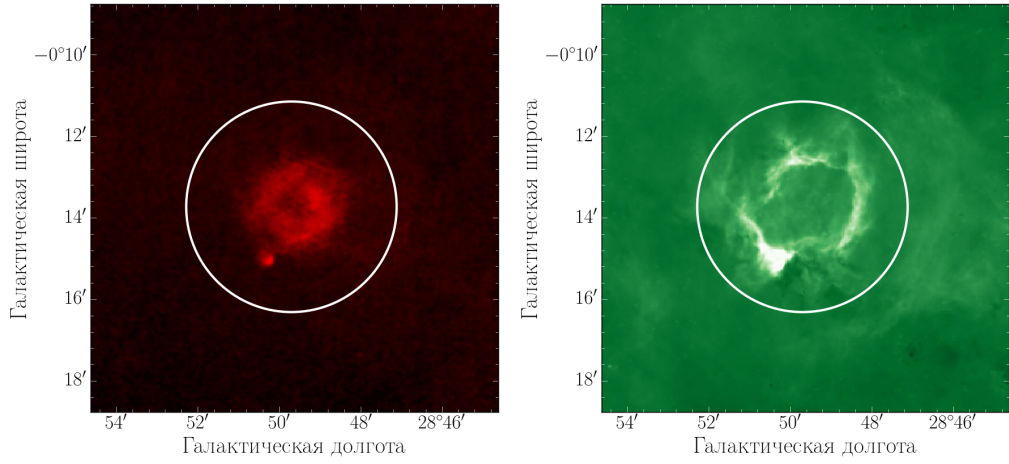


Рис. 3.1. ИК туманность N49. Слева: изображение в континууме на длине волны 20 см по данным обзора New GPS 20 см [30]. Справа: изображение на длине волны 8 мкм. Белым контуром показана апертура, внутри которой проводился расчёт потока на 20 см.

3.2. Оценка спектральных классов ионизирующих звёзд

Результаты определения потока в радиоконтинууме на длине волны 20 см в направлении 91 объекта из нашего каталога представлены в табл. 3.1 (Приложение 6). Для определения спектрального класса звёзд сначала оценивался поток УФ квантов (Q_{Ly}), ионизирующих водород в ИККТ, в предположении, что радиоизлучение является оптически тонким, что выполняется для классических областей НII, хотя может не выполняться для гиперкомпактных, ультракомпактных и гигантских областей НII (напр., [65, 66]). Соответствующее выражение приведено в работе [64]:

$$Q_{\text{Ly}} \gtrsim 7.54 \times 10^{46} \left(\frac{T_e}{10^4 \text{K}} \right)^{-0.45} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{0.1} \left(\frac{F_{20}}{\text{Jy}} \right) \left(\frac{D}{\text{kpc}} \right)^2 s^{-1}, \quad (3.2.1)$$

где T_e — электронная температура, значение которой принято равным 10^4 K, что типично для областей НII (напр., [67]); $\nu = 1.49$ ГГц — частота, соответствующая длине волны 20 см; F_{20} — поток на 20 см; D — расстояние до области НII. По сути, определяемая таким образом величина Q_{Ly} является нижней границей потока ионизирующих УФ квантов, поскольку из-за

неоднородного распределения вещества МЗС УФ кванты могут просачиваться сквозь разреженные части молекулярных облаков наружу. Доля таких УФ квантов в полном потоке Q_{Ly} пренебрежимо мала (см. [68]).

Для оценки спектральных классов по имеющимся величинам Q_{Ly} использовались результаты теоретических расчетов из работ [69, 70]. Результаты [70] позволяют оценить спектральный класс и эффективную температуру по значению Q_{Ly} для 42 объектов выборки, однако эти оценки основаны на предположении, что все области образованы звёздами, имеющими класс светимости V. Это предположение не всегда верно, поскольку молодые звёзды, ионизирующие ИККТ, могут быть и гигантами [71–73], поэтому нами также использовались таблицы из работы [69] для III и V класса светимости. Класс светимости Ia не рассматривался, поскольку наши оценки Q_{Ly} не попадают в диапазон, рассмотренный для этого класса светимости в работе [69].

На основании данных о расстоянии до объекта и его угловом размере (см. табл. 1.1 в Приложении 1) определялась концентрация электронов в ИККТ с помощью выражения из работы [75]:

$$n_e = 3.1113 \times 10^2 C_1 \left(\frac{F_{20}}{Jy} \right)^{0.5} \left(\frac{T_e}{10^4 K} \right)^{0.25} \left(\frac{D}{kpc} \right)^{-0.5} b(\nu, T)^{-0.5} \theta_R^{-1.5} cm^{-3}, \quad (3.2.2)$$

где θ_R — угловой размер области в минутах, C_1 — константа, равная 0.8165 для однородной сферы [75], а коэффициент $b(\nu, T)$ рассчитан по формуле

$$b(\nu, T) = 1 + 0.3195 \log_{10} \left(\frac{T_e}{10^4 K} \right) - 0.213 \log_{10} \left(\frac{\nu}{1 GHz} \right). \quad (3.2.3)$$

Спектральные классы ионизирующих звёзд и параметры ИККТ представлены в таблице 3.2 (Приложение 7). Спектральные классы лежат в интервале от O7 до B1, что соответствует интервалу эффективных температур от 28 000 до 39 000 К. В колонках таблицы 3.2 (Приложение 7) представлены

через косую черту два спектральных класса ионизирующего источника, между температурами которых проводилась интерполяция. Также значения эффективных температур в таблице 3.2 (Приложение 7) были округлены до тысяч.

В дальнейшем в диссертационной работе для сопоставления полученных оценок параметров звёзд с параметрами областей НП для определённости использовались результаты, полученные по данным [70] для V класса светимости, поскольку они позволили оценить спектральный класс и T_{eff} звёзд для максимального числа областей НП. Конечно, есть различия в оценках эффективных температур, так как методы в работах были различны и при сравнении теоретических расчётов с полученными данными необходимо учитывать все три случая.

На рис. 3.2 приведены распределения источников ионизирующего излучения по массе и эффективной температуре в предположении, что все звёзды находятся на главной последовательности. Для оценки массы по эффективной температуре звезды использовалось выражение

$$\log m = -132.2 + 95.82 \log T_{\text{eff}} - 23.36 \log T_{\text{eff}}^2 + 1.924 \log T_{\text{eff}}^3, \quad (3.2.4)$$

основанное на данных из работы [86]. Видно, что исследуемые в диссертации объекты в основном образуются звездами с эффективной температурой около 33 000 К (массой около $20 M_{\odot}$). Звезды меньших масс с меньшей вероятностью создают ИККТ, количество центральных звезд большей массы убывает в примерном соответствии с общим распределением звезд по массам.

На рис. 3.3 цветом показано, как электронная концентрация n_e соотносится с размером ИККТ и эффективной температурой T_{eff} ионизирующей звезды. Хорошо видно, что при фиксированном значении T_{eff} n_e имеет меньшие значения для ИККТ большего размера. Исключением является

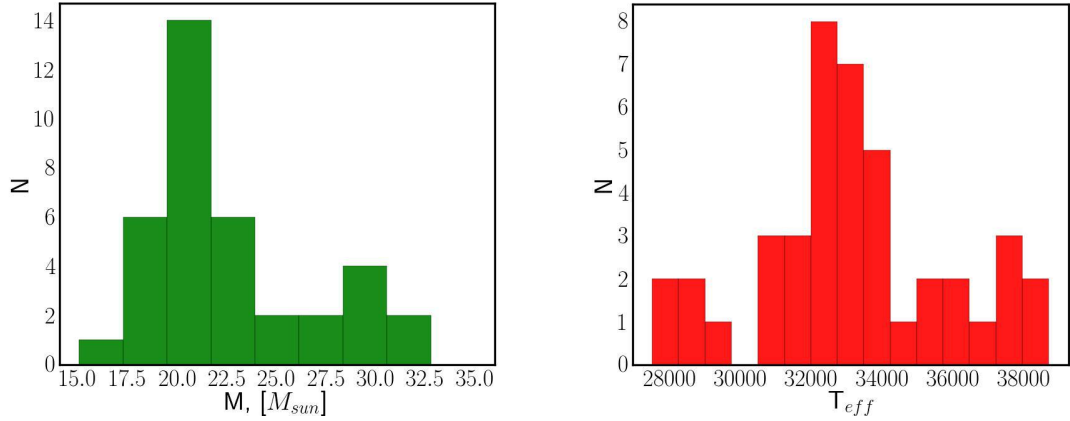


Рис. 3.2. Распределения источников ионизирующего излучения по массе (слева) и эффективной температуре (справа).

область N4, которая имеет сложную морфологию и поэтому исключена из дальнейшего анализа.

Результаты, показанные на рис. 3.3, соответствуют представлению о том, что ИККТ увеличивается в процессе эволюции, и электронная концентрация в ней уменьшается. Это подтверждается общим теоретическим рассмотрением и численным моделированием [5,21]. Таким образом, в представленном каталоге могут присутствовать последовательности ИККТ, находящихся на различных стадиях эволюции.

3.3. Сравнение потоков в радио и ИК диапазонах

В этом разделе проведен анализ связи потоков в радио и ИК диапазонах. Предполагается, что излучение на 8 мкм — это излучение ПАУ, излучение на 24 мкм генерируется мелкой горячей пылью, а излучение на 160 мкм — крупной холодной пылью [43,63]. Чтобы исключить влияние различия в расстояниях, значения потоков умножались на коэффициент $1/D^2$. На рис. 3.4 показана зависимость нормированного потока в ИК диапазоне на длинах волн 8 мкм, 24 мкм и 160 мкм от потока в радиодиапазоне на 20 см. Данные, приведенные на рис. 3.4, показывают, что бóльшим значениям

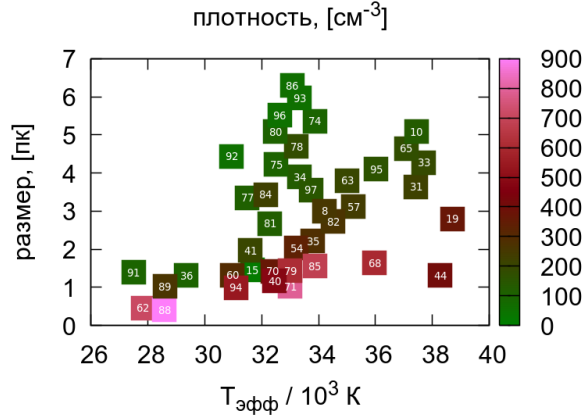


Рис. 3.3. Предполагаемые эволюционные цепочки областей НII. Горизонтальная ось — T_{eff} центральной звезды, вертикальная — размер области НII, цветом показана электронная концентрация в области НII. Объекты показаны цифрами (см. таблицы 3.1 и 3.2). Объекты 71 и 79 были сдвинуты немного по ординате, чтобы было видно их номера.

потоков в радиоконтинууме соответствуют бóльшие значения потоков во всех ИК диапазонах.

Наибольшие неопределённости в показанных зависимостях обусловлены ошибкой определения F_{20} . Ошибка в потоках рассчитана по анализу дисперсии интенсивностей излучения в расположенной на том же кадре фоновой площадке (выбор апертуры фона описан в Главе 1). Вклад инструментальной ошибки не превышает 0.5%, поэтому она не учитывается. Ошибки в ИК диапазоне намного ниже и на рис. 3.4 неразличимы.

Из представленных диаграмм видно, что ИК потоки примерно линейно возрастают с увеличением потока в радио. При этом зависимость F_8 от F_{20} имеет наибольший разброс. Поскольку поток в радиодиапазоне и светимость звёзд главной последовательности зависят от эффективной температуры звезды, представленная корреляция, на первый взгляд, вполне объяснима: чем ярче и горячее звезда, тем интенсивнее излучение пыли, которая нагревается этой звездой. Однако отметим, что при данной светимости звезды поток в ИК диапазоне определяется не только температурой пылевой оболочки вокруг ИККТ, но и её массой [45]. Излучение на 8 мкм

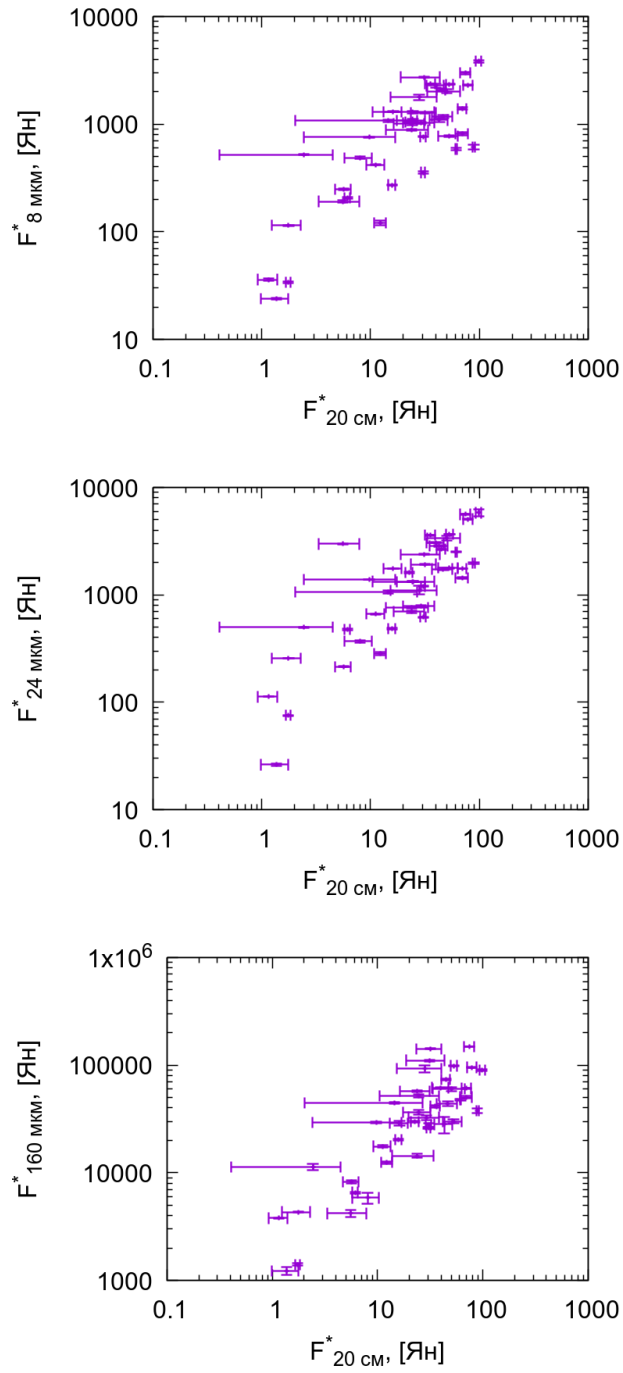


Рис. 3.4. Зависимость потока в ИК диапазоне от потока в радиодиапазоне для нормированных значений потоков.

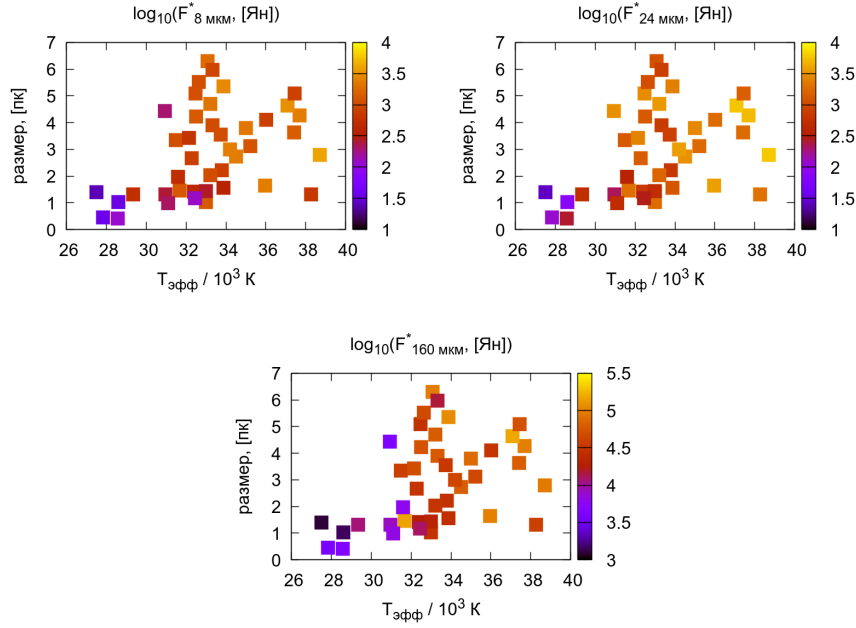


Рис. 3.5. Диаграмма “эффективная температура – размер области HII – поток” для 8, 24 и 160 мкм. Величина потока показана цветом.

и особенно на 24 мкм частично перекрывается с излучением “тёплых” пылинок. В этом случае невозможно отличить, с изменением какого из двух параметров связаны корреляции потоков инфракрасного излучения F_8 и F_{24} с потоком в радиодиапазоне F_{20} .

Ещё один фактор, от которого зависит поток ИК излучения пылевой оболочки ИККТ — её размер. На рис. 3.5 цветом показано, как соотносятся инфракрасные потоки с эффективной температурой ионизирующей звезды и размером ИККТ. Видно, что при фиксированном значении эффективной температуры ионизирующей звезды явная корреляция между потоком и размером области отсутствует. Приведенные выше результаты анализа данных рис. 3.3 показывают, что размер ИККТ при определенном значении $T_{\text{эфф}}$ является индикатором возраста. Таким образом, мы получаем косвенное свидетельство отсутствия явной корреляции между возрастом ИККТ и изменением её излучения (ростом или уменьшением) в инфракрасном диапазоне. Такое увеличение могло бы происходить из-за увеличения массы оболочки за счёт нагреваемого вещества окружающего молекулярного об-

лака. Полученные нами результаты могут означать, что из-за неоднородного распределения газа вокруг ИККТ существенного роста массы оболочки не происходит.

Одним из важных результатов данного исследования являются определённые нами значения эффективной температуры звезды и электронной концентрации в исследуемых областях НП. Эти параметры являются начальными данными, которые помогут в дальнейшем сравнить результат наблюдения с моделированием ИККТ.

В предыдущей главе мы пришли к выводу, что спектральный индекс $\alpha_{70/160}$ может являться индикатором температуры пыли в оболочке, поскольку в оптически тонком режиме он не очень чувствителен к количеству пыли на луче зрения [80]. Интересно сопоставить его величину с интенсивностью ИК излучения вещества во внутренней области. Такое сопоставление производится на рис. 3.6, где цветом показан размер ИККТ, расстояния до которых известны, что верно для 17 из 32 “идеальных” источников (см. Главу 1). Чёрным цветом показаны объекты с неизвестными расстояниями. Мы видим, что интенсивность излучения внутренней области показывает положительную корреляцию со спектральным индексом внешней области, причём результат и в этом случае не зависит существенно от размера области. Эти корреляции также могут стать критерием для оценки адекватности численных моделей.

Нами также была оценена возможность использования спектрального индекса $\alpha_{70/160}$ в качестве индикатора геометрии объекта, точнее, для проверки, что рассматриваемые нами объекты действительно по форме близки к одномерным сферам. Если предположить, что объекты имеют “двухмерную” структуру, то есть подобны торами, видимым “плашмя”, то излучение в направлении на внутреннюю область идёт от вещества вокруг звезды. Иными словами, если отсутствуют передняя и задняя стенки оболочки, то у более горячих звёзд ярче светит пыль во внутренней области. Если же

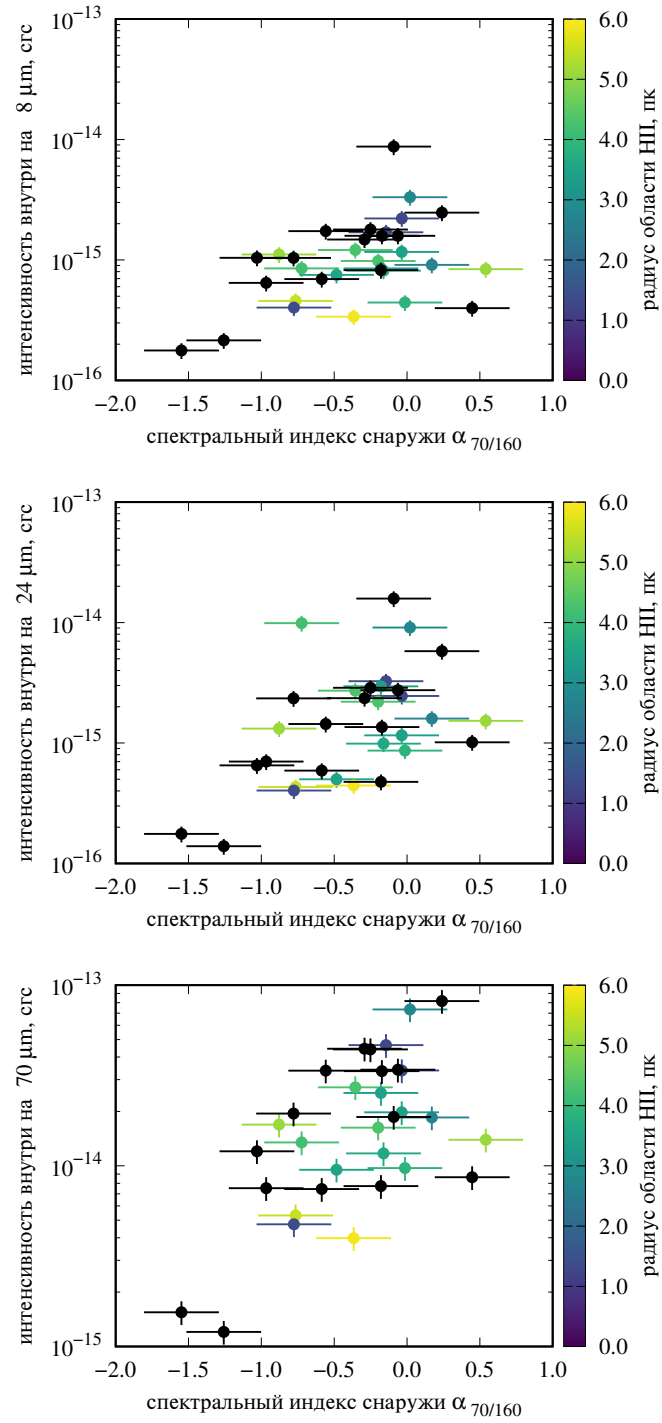


Рис. 3.6. Средняя интенсивность излучения внутренней области на 8, 24 и 70 мкм, как функция спектрального индекса $\alpha_{70/160}$ для внешней области. Цвет точки обозначает линейный размер ИККТ (чёрным цветом показаны объекты с неизвестным размером).

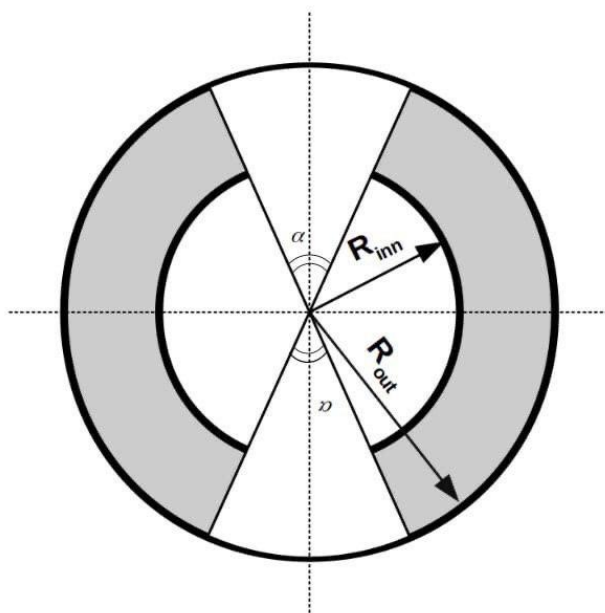


Рис. 3.7. Схема теоретической модели ИККТ. Углы раствора варьируются в диапазоне 0° - 170° , параметры R_{inn} и R_{out} — от нуля до внешней границы наблюдательных данных ИККТ.

оболочка объекта примерно сферически-симметрична, то и в направлении её центра значительный вклад в излучение будут вносить передняя и задняя стенки. Чтобы продемонстрировать это, мы использовали модель, в которой объект представляется полым шаром с вырезом (рис. 3.7).

На рис. 3.8 показаны теоретические радиальные профили спектрального индекса $\alpha_{70/160}$ для такого объекта с разными углами раствора. В модели варьируются как величина угла, так и внешний и внутренний радиусы пылевой оболочки (см. рис. 3.7). Предполагается, что среда оптически тонкая, температура внутри равна 35 К, снаружи — 25 К. При этих значениях величины спектральных индексов для внешней и внутренней областей в случае идеального полого шара примерно соответствуют значениям для реальных объектов. Из рис. 3.8 видно, что в случае такой торопоподобной структуры значения $\alpha_{70/160}$ во внутренней и внешней областях отличались бы гораздо сильнее, чем в наблюдениях.

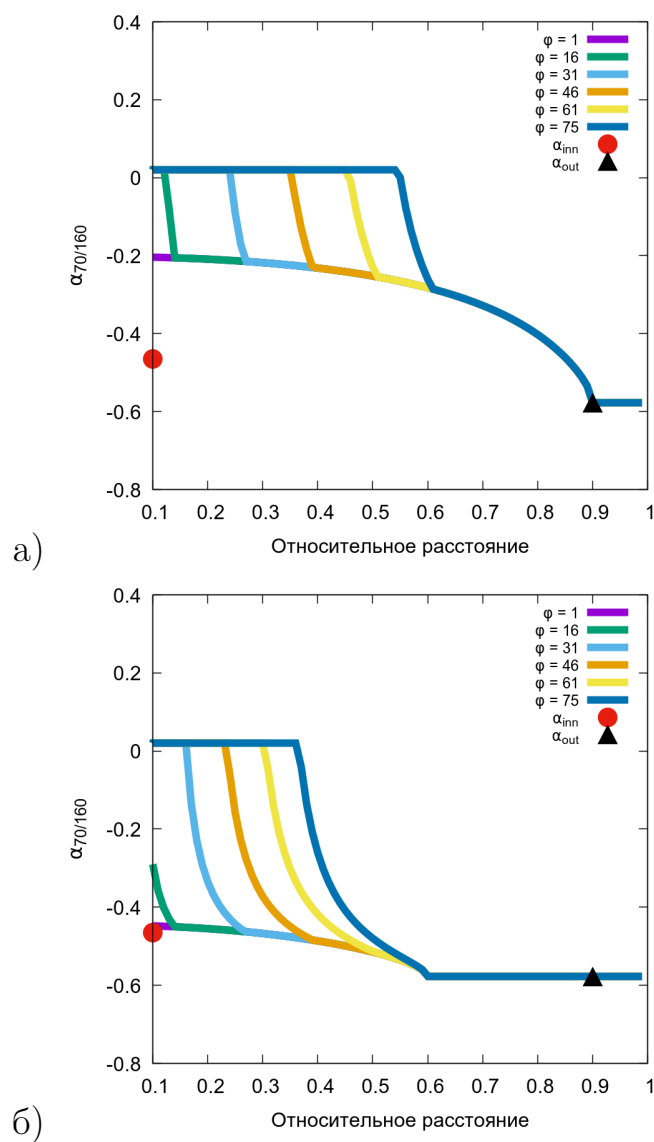


Рис. 3.8. Радиальное распределение $\alpha_{70/160}$ для простой геометрической модели. Цветными линиями показаны случаи для разных углов раствора в градусах. Красной точкой отмечено типичное наблюдаемое значение $\alpha_{70/160}$ внутри объекта, чёрным треугольником — типичное наблюдаемое значение $\alpha_{70/160}$ снаружи объекта. Рисунок а) соответствует случаю, когда у объекта геометрически тонкая оболочка, рисунок б) соответствует случаю толстой оболочки.

3.4. Моделирование инфракрасных спектров ИККТ

В заключение мы приведём пример моделирования излучения ИККТ, результаты которого можно сравнивать с наблюдениями. Для изучения факторов, влияющих на формирование ИК излучения в ИККТ, мы будем использовать два различных подхода. В рамках более простого первого подхода рассчитывается спектр излучения элементарного объема среды с заданными параметрами пыли и внешнего поля излучения. При таком подходе структура самой ИККТ не моделируется, и предполагается, что ультрафиолетовое излучение центральной звезды беспрепятственно доходит до рассматриваемого элементарного объёма. Распределение пыли по размерам и её химический состав берутся из работы [87]. Для расчёта тепловых параметров объёма и спектра его излучения используется общедоступная программа DustEM [88]. Особенностью этой программы является учёт стохастического нагрева пылинок, их химического состава и произвольного внешнего поля излучения. В рамках данного подхода исследовалась зависимость ИК спектра излучения рассматриваемого объёма от расстояния до звезды, а также зависимость спектра от содержания ПАУ-частиц в общей массе пыли. Результаты расчётов приведены на рис. 3.9. Очевидно, что при увеличении расстояния интенсивность ИК излучения пыли падает во всем диапазоне длин волн. Интересно, что с увеличением расстояния от звезды отношение интенсивностей на 8 и 24 мкм I_8/I_{24} растёт. Этот рост связан со спецификой нагрева мелких и крупных пылинок. Действительно, максимальная температура мелких пылинок (ПАУ), определяющих основной вклад в излучение на 8 мкм, не зависит от расстояния до звезды, поскольку определяется единичными УФ квантами. В то же время температура более крупных пылинок, вносящих максимальный вклад на 24 мкм, зависит от средней интенсивности внешнего излучения и потому падает с расстоянием. Как следствие, отношение интенсивностей I_8/I_{24} растёт с расстоянием. Про-

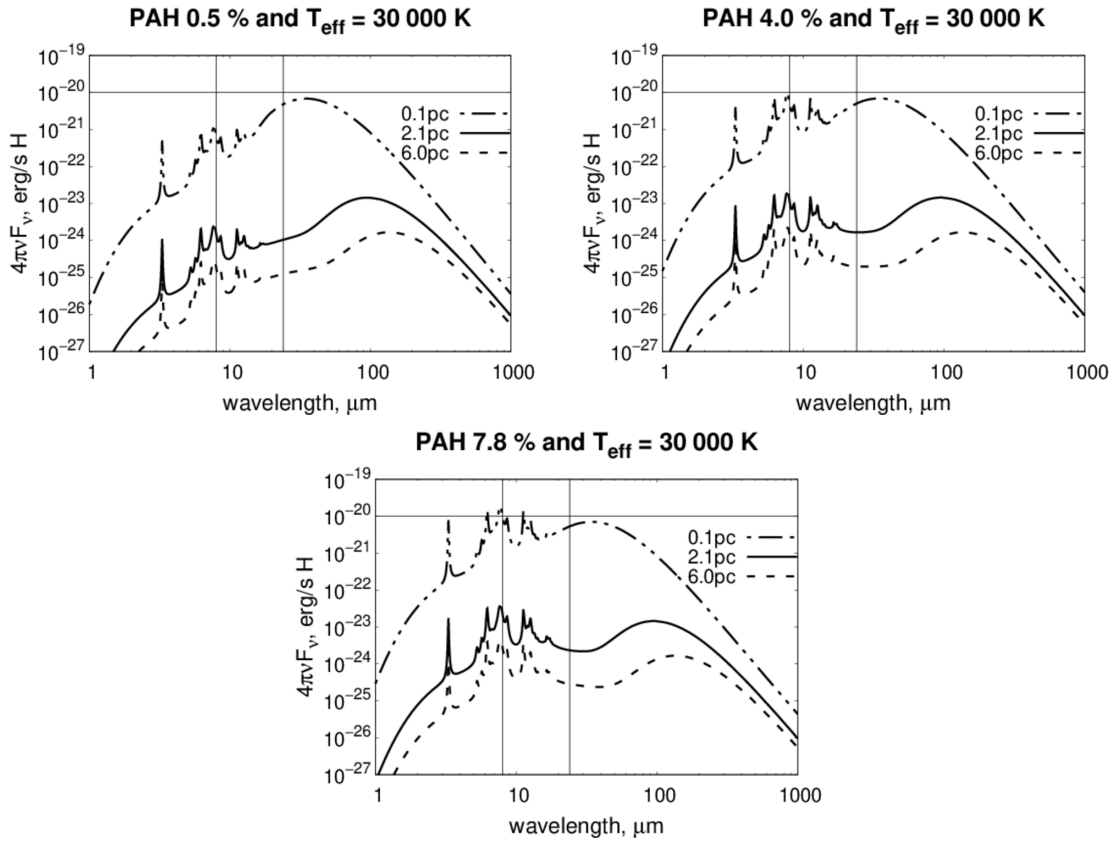


Рис. 3.9. Спектральные распределения энергии, вычисленные с помощью программы DustEM для элементарного объёма среды при фиксированной температуре звезды $T = 3 \times 10^4 \text{ K}$. Различными линиями показаны спектры для объёмов, расположенных на различных расстояниях от звезды. Различные панели соответствуют различному содержанию полициклических ароматических углеводородов. Вертикальные линии соответствуют длинам волн 8 и 24 микрон.

гнозируемым результатом является также рост интенсивности излучения в диапазоне 4–16 мкм при повышении содержания ПАУ-частиц. Используемый подход оказался удобным для быстрого предварительного анализа факторов, влияющих на параметры ИК спектра. С его помощью можно выделить наиболее существенные факторы, определяющие спектральные проявления объектов, и учесть их в более детальных моделях.

В рамках второго подхода моделируется полная физическая структура ИККТ и рассчитываются распределения интенсивности ИК излучения. Структура ИККТ моделируется с помощью программного комплекса MARION, описанного в работах [21, 22, 46]. Структура ИККТ рассчитыва-

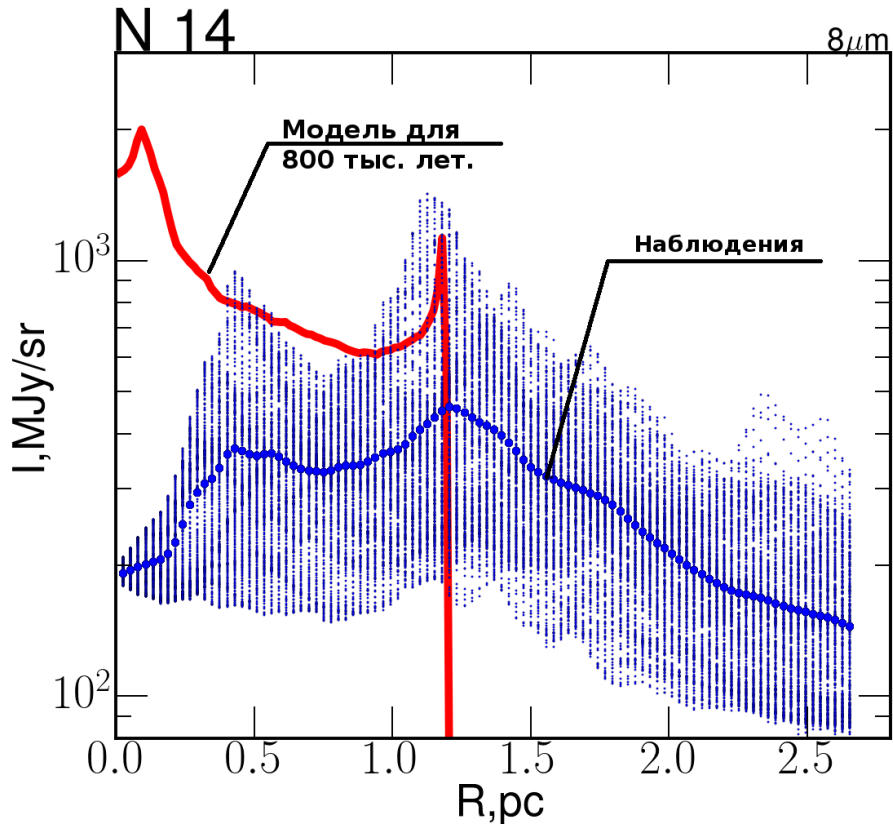


Рис. 3.10. Радиальные распределения интенсивности излучения на 8 мкм для объекта N14. Мелкими точками показаны наблюдаемые значения для всех азимутов. Крупными точками показан усредненный по азимуту наблюдательный профиль. Жирной линией показано теоретическое распределение для модели области НII с температурой звезды 37 000 К и возрастом 800 тыс. лет.

ется путём моделирования её эволюции с учётом ключевых газодинамических, тепловых и химических процессов. В этой модели учитывается также дрейф пыли под воздействием светового давления. Для расчётов спектров ИК излучения используется программный комплекс NATALY [19].

Результаты моделирования радиального профиля интенсивности излучения на 8 мкм и его сравнение с наблюдениями объекта N14 показаны на рис. 3.10. Видно, что теоретические и наблюдательные интенсивности по направлению на внешнее кольцо (1.2 парсек) близки, что говорит в пользу модели. Положение пика в модели зависит от возраста ИККТ, что позволяет оценить её возраст. Полученное распределение соответствует возрасту 800 тыс. лет. Существенным отличием модельного и наблюдательного про-

филя является их расхождение во внутренней области, что свидетельствует о том, что в модели не учтён какой-то механизм, ответственный за отсутствие мелкой пыли во внутренней области. Таким образом, моделирование ИК излучения является хорошим инструментом проверки физических моделей ИККТ. С его помощью мы планируем более подробно исследовать роль механизмов, которые могут быть ответственны за эволюцию пыли в ИККТ, используя теоретическое моделирование с помощью инструментов MARION [21] и SHIVA [89].

3.5. Положения, выносимые на защиту

По результатам третьей главы на защиту выносится следующее положение:

- 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.

Заключение

Соискателем проведено комплексное исследование возможностей определения параметров областей звездообразования путем фотометрического анализа ИККТ. Составлен каталог, состоящий из 99 объектов с оценками их морфологических параметров.

Исследован вклад ПАУ, мелких и крупных пылинок в излучение ИККТ. Показано, что различная обработка и анализ данных из разных ресурсов могут существенно влиять на оценку получаемых из наблюдений параметров ИККТ, в частности, массовой доли ПАУ, эффективной температуры ионизирующего источника, электронной концентрации. Эти параметры могут использоваться как начальные данные в теоретических моделях структуры и эволюции ИККТ.

Итогом работы также является выборка из 32-х объектов, которые могут быть использованы при химико-динамическом моделировании ИККТ с помощью относительно простых и надежных одномерных численных моделей. Полный набор полученных данных для 99 ИККТ (рабочий каталог) является инструментом, пригодным для диагностики условий в областях образования массивных звёзд.

В дальнейшем соискатель планирует применить отработанную методику для сравнения наблюдаемых параметров и оценок с теоретическими исследованиями, в частности, провести моделирование ИККТ в одномерном химико-динамическом коде MARION, а также расширить данную методику для возможности работать с другими моделями, в том числе, блистерных областей НП и инфракрасных туманностей другой природы.

Приложение 1

Таблица 1.1: Результаты приближения формы объектов эллипсами по изображениям на длине волны 8 мкм. Объекты взяты из:

1) R. H. Becker et al. 1994 [77], 2) R. J. Simpson et al. 2012 [52],
3) E. Churchwell et al. 2006 [12], 4) новые объекты,
5) J. S. Urquhart et al. 2009 [78], 6) M. P. Egan et al. 2003 [79].

N ^o	Наименование объекта	$l_{\text{gal}},^{\circ}$	$b_{\text{gal}},^{\circ}$	$a, ''$	$b, ''$	e	PA, $^{\circ}$
1	S15 ³	343.916	-0.648	140	108	0.64	12
2	S21 ³	341.358	-0.288	51	37	0.69	178
3	S44 ³	334.524	0.820	156	121	0.64	87
4	S123 ³	312.978	-0.433	149	124	0.56	133
5	S145 ³	308.717	0.623	382	272	0.70	139
6	S167 ³	301.627	-0.345	389	364	0.35	95
7	CN67 ³	5.526	0.037	54	32	0.80	33
8	CN77 ³	6.139	-0.640	67	48	0.70	75
9	CN79 ³	6.202	-0.334	70	54	0.64	121
10	CN111 ³	8.311	-0.086	99	88	0.47	37
11	MWP1G008430-002800S ²	8.431	-0.276	21	9	0.89	40
12	CN116 ³	8.476	-0.277	22	16	0.69	75
13	N4 ³	11.893	0.747	130	112	0.51	140
14	MWP1G012590-000900S ²	12.595	-0.090	13	11	0.54	105
15	MWP1G012630-000100S ²	12.633	-0.017	10	6	0.79	134
16	N8 ³	12.805	-0.312	13	12	0.21	17
17	MWP1G013213-001410 ²	13.213	-0.141	30	21	0.73	60
18	N13 ³	13.899	-0.014	33	24	0.68	170
продолжение следует							

(продолжение)							
N ^o	Наименование объекта	$l_{\text{gal}},^{\circ}$	$b_{\text{gal}},^{\circ}$	$a, ''$	$b, ''$	e	PA, °
19	N14 ³	14.000	−0.136	78	71	0.41	80
20	G014.175+0.024 ^{6,1}	14.175	0.022	11	10	0.44	179
21	MWP1G014210−001100S ²	14.206	−0.110	13	7	0.82	48
22	MWP1G014390−000200S ²	14.388	−0.024	26	13	0.86	157
23	MWP1G014480−000000S ²	14.490	0.022	14	11	0.68	54
24	MWP1G016390−001400S ²	16.391	−0.138	7	6	0.45	132
25	MWP1G016429−001984 ²	16.431	−0.201	57	44	0.64	14
26	MWP1G016560+000056 ²	16.560	0.002	19	14	0.72	179
27	MWP1G017626+000493 ²	17.625	0.048	24	23	0.29	70
28	TWKK1 ⁴	17.805	0.074	13	12	0.45	102
29	N20 ³	17.918	−0.687	70	59	0.54	47
30	MWP1G018440+000100S ²	18.442	0.013	16	12	0.70	0
31	MWP1G018580+003400S ²	18.582	0.345	25	21	0.54	52
32	N23 ³	18.679	−0.237	27	23	0.48	167
33	MWP1G018743+002521 ²	18.748	0.256	31	25	0.58	51
34	MWP1G020387−000156 ²	20.388	−0.017	33	24	0.69	127
35	MWP1G02100−000500S ²	21.005	−0.054	17	15	0.46	104
36	N28 ³	21.351	−0.137	30	27	0.45	139
37	N31 ³	23.842	0.098	40	31	0.62	17
38	MWP1G023849−001251 ²	23.848	−0.127	20	17	0.46	146
39	MWP1G023881−003497 ²	23.881	−0.350	16	13	0.59	83
40	N32 ³	23.904	0.070	26	23	0.47	28
41	MWP1G023982−001096 ²	23.982	−0.110	19	16	0.54	85
42	MWP1G024019+001902 ²	24.043	0.204	7	5	0.65	71
43	MWP1G024149−000060 ²	24.153	−0.011	12	6	0.88	16
продолжение следует							

(продолжение)							
N ^o	Наименование объекта	$l_{\text{gal}},^{\circ}$	$b_{\text{gal}},^{\circ}$	$a, ''$	$b, ''$	e	PA, °
44	N33 ³	24.215	−0.044	26	22	0.55	24
45	TWKK3 ⁴	24.424	0.220	37	24	0.77	141
46	TWKK2 ⁴	24.460	0.506	12	6	0.87	49
47	MWP1G024500−002400 ²	24.502	−0.237	15	11	0.70	105
48	MWP1G024558−001329 ²	24.558	−0.133	50	43	0.53	104
49	MWP1G024649−001131 ²	24.651	−0.078	9	6	0.66	101
50	MWP1G01024699−001486 ²	24.700	−0.148	43	25	0.81	28
51	MWP1G024731+001580 ²	24.736	0.158	29	25	0.52	49
52	MWP1G024920+000800 ²	24.922	0.078	14	11	0.64	137
53	MWP1G025155+000609 ²	25.155	0.061	25	19	0.66	141
54	MWP1G025723+00058 ²	25.724	0.058	22	15	0.74	103
55	MWP1G025730−000200S ²	25.726	−0.027	10	8	0.58	64
56	N42 ³	26.329	−0.071	42	27	0.77	154
57	N43 ³	26.595	0.095	35	27	0.65	30
58	MWP1G026720+001700S ²	26.722	0.173	14	10	0.69	14
59	G027.492+0.192 ⁶	27.496	0.197	29	27	0.38	108
60	MWP1G02671+00300S ²	27.613	0.028	14	11	0.59	117
61	MWP1G027905−000079 ²	27.904	−0.009	9	4	0.86	119
62	G027.9334+00.2056 ^{6,5}	27.931	0.205	14	9	0.74	142
63	MWP1G027981+000753 ²	27.981	0.073	38	24	0.77	141
64	MWP1G028160−000300S ²	28.160	−0.046	11	9	0.60	88
65	N49 ³	28.827	−0.229	87	62	0.70	30
66	MWP1G029136−001438 ²	29.134	−0.144	27	16	0.80	86
67	N51 ³	29.156	−0.259	130	109	0.54	46
68	MWP1G030020−000400S ²	30.022	−0.041	19	17	0.47	16
продолжение следует							

(продолжение)							
№	Наименование объекта	$l_{\text{gal}}, ^\circ$	$b_{\text{gal}}, ^\circ$	$a, ''$	$b, ''$	e	PA, °
69	MWP1G030250+002413 ²	30.251	0.240	38	31	0.55	147
70	MWP1G03080+001100S ²	30.378	0.111	20	16	0.58	151
71	MWP1G030381-001074 ²	30.381	-0.109	17	12	0.69	141
72	MWP1G031066+000485 ²	31.071	0.049	9	7	0.69	73
73	MWP1G032057+000783 ²	32.055	0.076	49	42	0.52	44
74	N55 ³	32.101	0.091	65	43	0.75	170
75	MWP1G032731+002120 ²	32.730	0.212	33	30	0.40	19
76	N57 ³	32.761	-0.149	23	16	0.71	162
77	N60 ³	33.815	-0.149	38	32	0.53	166
78	MWP1G034088+004405 ²	34.087	0.441	41	22	0.84	142
79	MWP1G034680+000600S ²	34.684	0.067	12	8	0.70	102
80	N67 ³	35.544	0.012	52	43	0.57	10
81	MWP1G037196-004296 ²	37.195	-0.429	25	23	0.39	173
82	MWP1G037261-000809 ²	37.258	-0.078	26	20	0.65	74
83	MWP1G037349+006876 ²	37.351	0.688	42	34	0.58	147
84	N70 ³	37.750	-0.113	35	29	0.57	8
85	G038.550+1648 ⁶	38.551	0.162	14	8	0.81	36
86	N73 ³	38.736	-0.140	69	49	0.70	163
87	N78 ³	41.228	0.169	25	17	0.74	145
88	G041.378+0.035 ^{6,1}	41.378	0.034	10	8	0.54	43
89	N79 ³	41.513	0.031	81	53	0.76	103
90	TWKK4 ⁴	41.595	0.160	6	5	0.54	76
91	N80 ³	41.932	0.033	110	90	0.57	160
92	N89 ³	43.739	0.114	75	51	0.74	83
93	N90 ³	43.774	0.060	101	97	0.29	87
продолжение следует							

(продолжение)							
N°	Наименование объекта	$l_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$b_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$a, ''$	$b, ''$	e	PA, $^{\circ}$
94	MWP1G045540+000000S ²	45.544	-0.005	17	11	0.75	162
95	N96 ³	46.949	0.371	25	23	0.33	8
96	N98 ³	47.027	0.218	98	81	0.56	152
97	MWP1G048422+001173 ²	48.422	0.116	35	30	0.55	123
98	N102 ³	49.697	-0.164	122	112	0.39	138
99	N121 ³	55.444	0.887	36	33	0.43	46

Приложение 2

Таблица 1.2: Результаты приближения формы объектов эллипсами по изображениям на длине волны 70 мкм. Объекты взяты из:

1) R. H. Becker et al. 1994 [77], 2) R. J. Simpson et al. 2012 [52],
3) E. Churchwell et al. 2006 [12], 4) новые объекты,
5) J. S. Urquhart et al. 2009 [78], 6) M. P. Egan et al. 2003 [79].

№	Наименование объекта	$l_{\text{gal}},^{\circ}$	$b_{\text{gal}},^{\circ}$	$a, ''$	$b, ''$	e	PA, $^{\circ}$
1	S15 ³	343.917	−0.651	118	94	0.60	177
2	S21 ³	341.357	−0.288	50	38	0.65	179
3	S44 ³	334.526	0.815	125	120	0.28	128
4	S123 ³	312.979	−0.434	128	123	0.27	160
5	S145 ³	308.715	0.624	376	280	0.67	139
6	S167 ³	301.630	−0.349	394	305	0.63	117
7	CN67 ³	5.525	0.037	42	33	0.62	58
8	CN77 ³	6.140	−0.640	68	49	0.69	74
9	CN79 ³	6.203	−0.335	71	41	0.82	115
10	CN111 ³	8.306	−0.084	89	74	0.55	122
11	MWP1G008430–002800S ²	8.431	−0.274	22	12	0.82	45
12	CN116 ³	8.476	−0.278	16	11	0.72	107
13	N4 ³	11.892	0.748	121	110	0.41	134
14	MWP1G012590–000900S ²	—	—	—	—	—	—
15	MWP1G012630–000100S ²	12.633	−0.017	7	7	0.24	2
16	N8 ³	12.805	−0.312	13	9	0.72	112
17	MWP1G013213–001410 ²	13.212	−0.138	26	19	0.68	22
18	N13 ³	13.897	−0.013	25	20	0.60	145
продолжение следует							

(продолжение)							
№	Наименование объекта	$l_{\text{gal}}, ^\circ$	$b_{\text{gal}}, ^\circ$	$a, ''$	$b, ''$	e	PA, $^\circ$
19	N14 ³	14.002	−0.135	83	61	0.68	91
20	G014.175+0.024 ^{6,1}	14.175	0.023	9	7	0.59	66
21	MWP1G014210−001100S ²	—	—	—	—	—	—
22	MWP1G014390−000200S ²	14.390	−0.023	13	12	0.49	16
23	MWP1G014480−000000S ²	—	—	—	—	—	—
24	MWP1G016390−001400S ²	—	—	—	—	—	—
25	MWP1G016429−001984 ²	16.432	−0.201	46	37	0.60	20
26	MWP1G016560+000056 ²	16.559	0.002	14	13	0.42	2
27	MWP1G017626+000493 ²	17.626	0.048	22	21	0.28	83
28	TWKK1 ⁴	17.805	0.074	11	8	0.69	86
29	N20 ³	17.917	−0.684	58	53	0.41	180
30	MWP1G018440+000100S ²	18.442	0.013	11	6	0.84	151
31	MWP1G018580+003400S ²	18.583	0.347	21	16	0.68	87
32	N23 ³	18.680	−0.237	25	21	0.56	155
33	MWP1G018743+002521 ²	18.748	0.257	27	25	0.39	27
34	MWP1G020387−000156 ²	20.388	−0.017	27	23	0.53	156
35	MWP1G02100−000500S ²	21.005	−0.053	17	14	0.59	126
36	N28 ³	21.351	−0.138	31	26	0.55	149
37	N31 ³	23.843	0.099	39	27	0.73	179
38	MWP1G023849−001251 ²	23.849	−0.128	18	16	0.40	17
39	MWP1G023881−003497 ²	23.881	−0.350	13	12	0.39	159
40	N32 ³	23.903	0.069	25	20	0.61	113
41	MWP1G023982−001096 ²	23.983	−0.111	15	12	0.62	115
42	MWP1G024019+001902 ²	24.043	0.204	7	7	0.43	134
43	MWP1G024149−000060 ²	24.151	−0.010	14	5	0.94	9
продолжение следует							

(продолжение)							
N ^o	Наименование объекта	$l_{\text{gal}},^{\circ}$	$b_{\text{gal}},^{\circ}$	$a, ''$	$b, ''$	e	PA, °
44	N33 ³	24.215	−0.044	24	18	0.68	179
45	TWKK3 ⁴	24.427	0.222	25	21	0.52	75
46	TWKK2 ⁴	24.461	0.507	11	7	0.79	37
47	MWP1G024500−002400 ²	24.502	−0.236	16	11	0.73	95
48	MWP1G024558−001329 ²	24.558	−0.134	44	37	0.55	61
49	MWP1G024649−001131 ²	—	—	—	—	—	—
50	MWP1G01024699−001486 ²	24.699	−0.147	43	27	0.78	12
51	MWP1G024731+001580 ²	24.736	0.158	26	18	0.71	118
52	MWP1G024920+000800 ²	24.922	0.079	10	9	0.43	7
53	MWP1G025155+000609 ²	25.156	0.061	23	16	0.70	135
54	MWP1G025723+00058 ²	25.724	0.058	19	13	0.74	118
55	MWP1G025730−000200S ²	25.726	−0.027	9	7	0.63	62
56	N42 ³	26.329	−0.071	40	26	0.75	155
57	N43 ³	26.594	0.096	32	26	0.57	46
58	MWP1G026720+001700S ²	—	—	—	—	—	—
59	G027.492+0.192 ⁶	27.496	0.197	30	21	0.70	101
60	MWP1G02671+00300S ²	27.613	0.028	11	8	0.71	158
61	MWP1G027905−000079 ²	—	—	—	—	—	—
62	G027.9334+00.2056 ^{6,5}	27.932	0.205	12	9	0.64	5
63	MWP1G027981+000753 ²	27.979	0.072	26	23	0.48	71
64	MWP1G028160−000300S ²	28.160	−0.046	11	10	0.42	147
65	N49 ³	28.827	−0.230	84	67	0.58	36
66	MWP1G029136−001438 ²	29.133	−0.146	19	15	0.58	46
67	N51 ³	29.154	−0.257	129	100	0.64	18
68	MWP1G030020−000400S ²	30.021	−0.042	21	16	0.64	16
продолжение следует							

(продолжение)							
N°	Наименование объекта	$l_{\text{gal}},^{\circ}$	$b_{\text{gal}},^{\circ}$	$a, ''$	$b, ''$	e	PA, $^{\circ}$
69	MWP1G030250+002413 ²	30.251	0.240	25	19	0.67	8
70	MWP1G03080+001100S ²	30.378	0.110	19	16	0.54	134
71	MWP1G030381-0010744 ²	30.381	-0.109	15	13	0.40	151
72	MWP1G031066+000485 ²	—	—	—	—	—	—
73	MWP1G032057+000783 ²	32.056	0.076	48	40	0.54	114
74	N55 ³	32.100	0.091	59	42	0.71	163
75	MWP1G032731+002120 ²	32.729	0.212	31	29	0.31	45
76	N57 ³	32.762	-0.149	20	16	0.60	166
77	N60 ³	33.815	-0.149	36	34	0.34	25
78	MWP1G034088+004405 ²	34.086	0.441	28	22	0.65	145
79	MWP1G034680+000600S ²	—	—	—	—	—	—
80	N67 ³	35.544	0.012	49	40	0.57	22
81	MWP1G037196-004296 ²	37.197	-0.428	26	18	0.73	98
82	MWP1G037261-000809 ²	37.258	-0.078	22	18	0.57	80
83	MWP1G037349+006876 ²	37.351	0.689	38	25	0.76	145
84	N70 ³	37.749	-0.113	34	25	0.66	158
85	G038.550+164 ⁶	38.551	0.162	14	13	0.38	13
86	N73 ³	38.738	-0.139	54	51	0.32	55
87	N78 ³	41.229	0.170	19	14	0.67	19
88	G041.378+0.035 ^{6,1}	—	—	—	—	—	—
89	N79 ³	41.514	0.030	74	59	0.60	107
90	TWKK4 ⁴	—	—	—	—	—	—
91	N80 ³	41.937	0.032	99	71	0.70	136
92	N89 ³	43.739	0.113	60	56	0.38	72
93	N90 ³	43.774	0.060	101	96	0.31	94
продолжение следует							

(продолжение)							
N°	Наименование объекта	$l_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$b_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$a, ''$	$b, ''$	e	PA, $^{\circ}$
94	MWP1G045540+000000SS ²	—	—	—	—	—	—
95	N96 ³	46.948	0.371	24	19	0.64	152
96	N98 ³	47.029	0.219	87	82	0.34	148
97	MWP1G048422+001173 ²	48.422	0.116	29	29	0.22	164
98	N102 ³	49.698	-0.163	117	112	0.29	136
99	N121 ³	55.445	0.885	32	28	0.50	38

Приложение 3

Таблица 2.1: Потоки и телесные углы для внутренних областей 32 ИККГ. Названия объектов взяты из: 1) R. Н. Becker et al. 1994 [77], 2) R. J. Simpson et al. 2012 [52], 3) E. Churchwell et al. 2006 [12], 4) новые объекты, 5) J. S. Urquhart et al. 2009 [78], 6) M. P. Egan et al. 2003 [79].

Наименование объекта	l_{gal}°	F_8 , Ян	F_{24} , Ян	F_{70} , Ян	F_{160} , Ян	F_{250} , Ян	F_{350} , Ян	F_{500} , Ян	$\Omega, 10^{-8}$, ср
S123 ²	(312.97; -0.43)	43.1	46.8	502.4	1354.0	840.2	372.2	148.1	164
S167 ²	(301.62; -0.34)	90.5	89.9	790.4	3173.0	2476.0	1255.0	543.2	1250
CN111 ²	(8.31; -0.08)	34.8	41.4	531.0	1351.0	812.1	348.5	132.1	76.9
N67 ²	(35.54; 0.01)	6.8	12.3	113.3	218.9	136.9	59.5	23.8	19.9
N90 ²	(43.77; 0.06)	11.9	15.6	140.5	417.8	295.3	136.4	54.9	86.5
N96 ²	(46.94; 0.37)	0.9	1.8	20.3	29.8	17.7	7.7	3.1	5.12
N98 ²	(47.02; 0.21)	13.1	12.4	152.6	353.5	233.8	100.1	41.5	70.3
N102 ²	(49.69; -0.16)	19.6	49.8	425.3	644.2	418.3	197.5	82.0	121
продолжение следует									

(продолжение)									
Наименование объекта	$l_{\text{gal}}^{\circ}; b_{\text{gal}}^{\circ}$	F_8 , Ян	F_{24} , Ян	F_{70} , Ян	F_{160} , Ян	F_{250} , Ян	F_{350} , Ян	F_{500} , Ян	$\Omega, 10^{-8}$, ср
MWP1G017626+000493 ¹	(17.62; 0.04)	2.1	1.3	24.6	76.2	49.7	19.7	8.5	5.03
MWP1G018580+003400S ¹	(18.58; 0.34)	1.6	1.8	22.3	44.9	24.0	12.4	4.1	1.91
MWP1G048422+001173 ¹	(48.42; 0.11)	2.8	1.8	35.9	85.9	51.9	21.4	8.4	9.25
MWP1G024558-001329 ¹	(24.55; -0.13)	13.5	11.1	261.1	522.4	294.4	119.1	45.9	19.0
MWP1G037196-004296 ¹	(37.19; -0.42)	1.9	3.4	39.6	62.1	36.7	15.5	3.5	5.24
MWP1G032057+000783 ¹	(32.05; 0.07)	7.6	17.2	142.9	253.0	157.3	63.5	25.2	18.0
MWP1G018743+002521 ¹	(18.74; 0.25)	3.4	7.6	76.4	111.3	60.2	28.3	9.5	6.89
MWP1G037349+006876 ¹	(37.35; 0.68)	44.5	80.6	95.1	150.5	87.9	39.7	15.0	12.5
MWP1G024731+001580 ¹	(24.73; 0.15)	4.6	7.3	113.3	198.3	109.5	48.6	16.5	6.3

Приложение 4

Таблица 2.2: Потоки и телесные углы для внешних областей 32 ИККТ. Названия объектов взяты из: 1) R. Н. Becker et al. 1994 [77], 2) R. J. Simpson et al. 2012 [52], 3) E. Churchwell et al. 2006 [12], 4) новые объекты, 5) J. S. Urquhart et al. 2009 [78], 6) M. P. Egan et al. 2003 [79].

Наименование объекта	$l_{\text{gal}}^{\circ}; b_{\text{gal}}^{\circ}$	$F_8,$ Ян	$F_{24},$ Ян	$F_{70},$ Ян	$F_{160},$ Ян	$F_{250},$ Ян	$F_{350},$ Ян	$F_{500},$ Ян	$\Omega, 10^{-8},$ ср
S123 ²	(312.97; -0.43)	120.4	69.0	1243.0	3824.0	2432.0	1051.0	424.2	66.8
S167 ²	(301.62; -0.34)	257.3	178.2	1869.0	8795.0	6872.0	3445.0	1478.0	511
CN111 ²	(8.31; -0.08)	90.5	80.4	1278.0	3359.0	1995.0	826.8	311.2	31.4
N67 ²	(35.54; 0.01)	18.6	20.6	283.5	586.0	347.8	155.5	58.1	8.12
N90 ²	(43.77; 0.06)	36.8	28.1	372.3	1181.0	800.5	370.2	148.1	35.3
N96 ²	(46.94; 0.37)	2.2	3.3	43.1	69.6	42.03	18.4	8.5	2.09
N98 ²	(47.02; 0.21)	36.3	28.5	403.3	1046.0	722.2	331.0	133.6	28.7
N102 ²	(49.69; -0.16)	60.3	49.8	1015.0	1847.0	1134.0	522.0	209.2	49.2
продолжение следует									

(продолжение)									
Наименование объекта	$l_{\text{gal}}^{\circ}; b_{\text{gal}}^{\circ}$	$F_8,$ Ян	$F_{24},$ Ян	$F_{70},$ Ян	$F_{160},$ Ян	$F_{250},$ Ян	$F_{350},$ Ян	$F_{500},$ Ян	$\Omega, 10^{-8},$ ср
MWP1G017626+000493 ¹	(17.62; 0.04)	4.9	2.9	52.7	176.3	115.5	50.2	19.0	2.05
MWP1G018580+003400S ¹	(18.58; 0.34)	3.5	3.5	44.3	103.1	63.9	27.0	10.0	4.67
MWP1G048422+001173 ¹	(48.42; 0.11)	6.5	4.0	79.6	195.7	122.7	48.8	19.1	3.78
MWP1G024558-001329 ¹	(24.55; -0.13)	31.9	22.4	582.4	1237.0	695.8	278.8	110.3	7.76
MWP1G037196-004296 ¹	(37.19; -0.42)	4.5	5.6	85.0	150.9	92.3	40.7	18.1	2.14
MWP1G032057+000783 ¹	(32.05; 0.07)	18.4	18.1	341.8	739.4	457.8	216.2	86.0	7.34
MWP1G018743+002521 ¹	(18.74; 0.25)	7.6	12.5	162.7	276.9	158.3	61.4	25.3	2.81
MWP1G037349+006876 ¹	(37.35; 0.68)	106.9	132.5	196.6	334.8	203.2	86.1	34.8	5.10
MWP1G024731+001580 ¹	(24.73; 0.15)	10.6	14.0	260.1	493.4	277.5	109.8	44.4	2.57

Приложение 5

Таблица 2.3: Параметры ИККТ. Названия объектов взяты из:
 1) R. H. Becker et al. 1994 [77], 2) R. J. Simpson et al. 2012 [52],
 3) E. Churchwell et al. 2006 [12], 4) новые объекты,
 5) J. S. Urquhart et al. 2009 [78], 6) M. P. Egan et al. 2003 [79].

N°	Наименование объекта	$l_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$b_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$F_8, \text{Ян}$	$F_{24}, \text{Ян}$	$F_{70}, \text{Ян}$	$F_{160}, \text{Ян}$	$F_{250}, \text{Ян}$	$F_{350}, \text{Ян}$	$F_{500}, \text{Ян}$	$q_{\text{РАН}}$	U_{min}
1	S15 ³	343.916	-0.648	62.80±0.45	955.00±3.67	44500±39.99	50900±72.41	743±37.72	1210±13.24	506±5.06	0.47	10.0
2	S21 ³	341.358	-0.288	15.40±0.55	9.45±0.26	2190±12.69	3600±44.08	239±37.93	106±16.23	39±5.55	0.47	4.0
3	S44 ³	334.524	0.820	117.00±1.14	199.00±0.79	53600±58.92	60100±117.59	1480±72.06	576±25.73	186±7.72	0.47	10.0
4	S123 ³	312.978	-0.433	67.40±1.12	65.60±0.16	33000±34.87	64600±25.43	1090±16.76	460±6.31	165±4.33	0.47	5.0
5	S145 ³	308.717	0.623	786.00±6.82	2470.00±4.32	544000±200.73	493000±133.02	6850±104.21	4470±43	3010±5.05	0.47	12.0
6	S167 ³	301.627	-0.345	26.50±2.12	117.00±3.15	9150±226.58	29800±314.88	2820±242.66	2600±122.49	2300±49.94	0.47	1.5
7	CN67 ³	5.526	0.037	11.80±0.62	16.50±0.35	7880±11.29	13500±56.19	233±39.05	98±13.56	35±4.98	0.47	4.0
8	CN77 ³	6.139	-0.640	11.50±1.04	194.00±1.18	6470±19.09	5480±46.88	748±27.64	282±10.25	93±3.93	0.47	20.0
9	CN79 ³	6.202	-0.334	29.40±0.66	58.90±0.65	9410±16.64	14000±35.84	977±27.86	449±11.17	160±3.64	0.47	7.0
продолжение следует												

(продолжение)												
N°	Наименование объекта	$l_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$b_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$F_8, \text{Ян}$	$F_{24}, \text{Ян}$	$F_{70}, \text{Ян}$	$F_{160}, \text{Ян}$	$F_{250}, \text{Ян}$	$F_{350}, \text{Ян}$	$F_{500}, \text{Ян}$	q_{PAH}	U_{min}
90	TWKK4 ⁴	41.595	0.160	1.42±0.02	1.89±0.01	989±0.47	1100±1.16	16±0.99	6±0.50	2±0.15	0.47	10.0-12.0
91	N80 ³	41.932	0.033	14.20±0.22	15.50±0.40	2120±27.61	3620±62.84	264±43.74	131±18.61	56±6.16	0.47	3.0-4.0
92	N89 ³	43.739	0.114	5.14±0.14	80.00±1.01	3070±7.02	3190±8.25	45±5.62	27±1.68	17±0.68	0.47	10.0-12.0
93	N90 ³	43.774	0.060	23.90±0.40	20.50±0.46	707±30.03	2300±16.89	315±8.78	106±3.36	44±1.66	0.47	1.0-1.5
94	MWP1G045540+000000S ²	45.544	-0.005	5.72±0.11	13.30±0.16	5870±2.73	4480±3.32	59±2.21	24±1.53	±0.42	0.47	20.0-25.0
95	N96 ³	46.949	0.371	2.96±0.06	6.78±0.07	697±3.06	735±4.55	39±2.46	28±0.99	11±0.36	0.47	10.0
96	N98 ³	47.027	0.218	32.10±0.83	31.60±0.83	4580±28.84	9430±22.96	749±3.46	354±6.03	133±0.26	0.47-1.2	3.0-4.0
97	MWP1G048422+001173 ²	48.422	0.116	9.92±0.15	7.56±0.08	5560±7.19	8460±16.42	114±9.70	44±3.59	14±0.88	0.47	3.0-5.0
98	N102 ³	49.697	-0.164	11.40±1.55	64.00±0.57	20500±26.68	9300±38.27	133±24.35	65±10.37	64±2.94	0.47	25.0
99	N121 ³	55.444	0.887	1.65±0.04	10.50±0.14	317±2.91	1100±1.26	24±0.72	19±0.46	16±0.12	0.47	1.0-1.5

Приложение 6

Таблица 3.1: Результаты определения потока в радиоконтинууме на длине волны 20 см в направлении объектов из каталога соискателя, представленные в Приложениях 1 и 2 [20]. Объекты в каталоге взяты из работ: ¹R. H. Becker et al. 1994 [77], ²R. J. Simpson et al. 2012 [52], ³E. Churchwell et al. 2006 [12], ⁴J. S. Urquhart et al. 2009 [78], ⁵M. P. Egan et al. 2003 [79].

N°	Наименование объекта	$l_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$b_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$F_{20}, \text{Ян}$
1	S15 ³	343.916	-0.648	—
2	S21 ³	341.358	-0.288	—
3	S44 ³	334.524	0.820	—
4	S123 ³	312.978	-0.433	—
5	S145 ³	308.717	0.623	—
6	S167 ³	301.627	-0.345	—
7	CN67 ³	5.526	0.037	0.44 ± 0.14
8	CN77 ³	6.139	-0.640	1.91 ± 0.19
9	CN79 ³	6.202	-0.334	2.01 ± 0.23
10	CN111 ³	8.311	-0.086	2.48 ± 0.33
11	MWP1G008430-002800S ²	8.431	-0.276	0.22 ± 0.03
12	CN116 ³	8.476	-0.277	0.14 ± 0.02
13	N4 ³	11.893	0.747	4.74 ± 0.49
14	MWP1G012590-000900S ²	12.595	-0.090	0.23 ± 0.03
15	MWP1G012630-000100S ²	12.633	-0.017	0.19 ± 0.04
16	N8 ³	12.805	-0.312	0.11 ± 0.01
17	MWP1G013213-001410 ²	13.213	-0.141	1.68 ± 0.10
18	N13 ³	13.899	-0.014	0.59 ± 0.07
продолжение следует				

(продолжение)				
N°	Наименование объекта	$l_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$b_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$F_{20}, \text{ Ян}$
19	N14 ³	14.000	-0.136	7.19±0.43
20	G014.175+0.024 ^{6,1}	14.175	0.022	0.25±0.02
21	MWP1G014210-001100S ²	14.206	-0.110	0.25±0.01
22	MWP1G014390-000200S ²	14.388	-0.024	0.48±0.04
23	MWP1G014480-000000S ²	14.490	0.022	0.70±0.03
24	MWP1G016390-001400S ²	16.391	-0.138	0.16±0.03
25	MWP1G016429-001984 ²	16.431	-0.201	2.30±0.28
26	MWP1G016560+000056 ²	16.560	0.002	0.12±0.03
27	MWP1G017626+000493 ²	17.625	0.048	0.09±0.05
28	TWKK1 ⁴	17.805	0.074	0.03±0.01
29	N20 ³	17.918	-0.687	0.31±0.09
30	MWP1G018440+000100S ²	18.442	0.013	0.09±0.01
31	MWP1G018580+003400S ²	18.582	0.345	0.31±0.03
32	N23 ³	18.679	-0.237	0.79±0.07
33	MWP1G018743+002521 ²	18.748	0.256	0.37±0.03
34	MWP1G020387-000156 ²	20.388	-0.017	0.16±0.05
35	MWP1G02100-000500S ²	21.005	-0.054	0.17±0.01
36	N28 ³	21.351	-0.137	0.12±0.09
37	N31 ³	23.842	0.098	0.44±0.04
38	MWP1G023849-001251 ²	23.848	-0.127	0.14±0.03
39	MWP1G023881-003497 ²	23.881	-0.350	0.02±0.04
40	N32 ³	23.904	0.070	0.58±0.07
41	MWP1G023982-001096 ²	23.982	-0.110	0.07±0.02
42	MWP1G024019+001902 ²	24.043	0.204	0.02±0.01
43	MWP1G024149-000060 ²	24.153	-0.011	0.07±0.02
44	N33 ³	24.215	-0.044	0.82±0.02
продолжение следует				

(продолжение)				
N°	Наименование объекта	$l_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$b_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$F_{20}, \text{Ян}$
45	TWKK3 ⁴	24.424	0.220	0.73±0.02
46	TWKK2 ⁴	24.460	0.506	0.03±0.01
47	MWP1G024500–002400 ²	24.502	–0.237	0.13±0.01
48	MWP1G024558–001329 ²	24.558	–0.133	0.34±0.02
49	MWP1G024649–001131 ²	24.651	–0.078	0.07±0.01
50	MWP1G01024699–001486 ²	24.700	–0.148	0.20±0.03
51	MWP1G024731+001580 ²	24.736	0.158	0.19±0.01
52	MWP1G024920+000800 ²	24.922	0.078	0.32±0.02
53	MWP1G025155+000609 ²	25.155	0.061	0.50±0.06
54	MWP1G025723+00058 ²	25.724	0.058	0.25±0.02
55	MWP1G025730–000200S ²	25.726	–0.027	0.06±0.01
56	N42 ³	26.329	–0.071	0.38±0.09
57	N43 ³	26.595	0.095	0.55±0.11
58	MWP1G026720+001700S ²	26.722	0.173	0.29±0.01
59	G027.492+0.192 ⁶	27.496	0.197	2.21±0.05
60	MWP1G02671+00300S ²	27.613	0.028	0.06±0.01
61	MWP1G027905–000079 ²	27.904	–0.009	0.12±0.02
62	G027.9334+00.2056 ^{6,5}	27.931	0.205	0.10±0.02
63	MWP1G027981+000753 ²	27.981	0.073	0.42±0.04
64	MWP1G028160–000300S ²	28.160	–0.046	0.09±0.02
65	N49 ³	28.827	–0.229	2.46±0.27
66	MWP1G029136–001438 ²	29.134	–0.144	0.09±0.02
67	N51 ³	29.156	–0.259	1.04±0.45
68	MWP1G030020–000400S ²	30.022	–0.041	0.67±0.05
69	MWP1G030250+002413 ²	30.251	0.240	0.17±0.05
70	MWP1G03080+001100S ²	30.378	0.111	0.21±0.04
продолжение следует				

<i>(продолжение)</i>				
N°	Наименование объекта	$l_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$b_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$F_{20}, \text{ Ян}$
71	MWP1G030381-001074 ²	30.381	-0.109	0.42±0.08
72	MWP1G031066+000485 ²	31.071	0.049	0.59±0.01
73	MWP1G032057+000783 ²	32.055	0.076	0.35±0.10
74	N55 ³	32.101	0.091	0.43±0.16
75	MWP1G032731+002120 ²	32.730	0.212	0.07±0.07
76	N57 ³	32.761	-0.149	0.18±0.04
77	N60 ³	33.815	-0.149	0.21±0.06
78	MWP1G034088+004405 ²	34.087	0.441	0.36±0.11
79	MWP1G034680+000600S ²	34.684	0.067	0.14±0.01
80	N67 ³	35.544	0.012	0.42±0.08
81	MWP1G037196-004296 ²	37.195	-0.429	0.08±0.06
82	MWP1G037261-000809 ²	37.258	-0.078	0.34±0.01
83	MWP1G037349+006876 ²	37.351	0.688	0.32±0.07
84	N70 ³	37.750	-0.113	0.60±0.01
85	G038.550+1648 ⁶	38.551	0.162	0.23±0.01
86	N73 ³	38.736	-0.140	0.24±0.14
87	N78 ³	41.228	0.169	0.02±0.01
88	G041.378+0.035 ^{6,1}	41.378	0.034	0.10±0.06
89	N79 ³	41.513	0.031	1.03±0.05
90	TWKK4 ⁴	41.595	0.160	0.01±0.01
91	N80 ³	41.932	0.033	0.57±0.22
92	N89 ³	43.739	0.114	0.15±0.06
93	N90 ³	43.774	0.060	0.64±0.27
94	MWP1G045540+000000S ²	45.544	-0.005	0.17±0.01
95	N96 ³	46.949	0.371	0.20±0.04
96	N98 ³	47.027	0.218	0.43±0.37
<i>продолжение следует</i>				

<i>(продолжение)</i>				
N°	Наименование объекта	$l_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$b_{\text{gal}}, ^{\circ}$	$F_{20}, \text{ Ян}$
97	MWP1G048422+001173 ²	48.422	0.116	0.28±0.10
98	N102 ³	49.697	−0.164	—
99	N121 ³	55.444	0.887	—

Приложение 7

(продолжение)										
N°	S , пк	D , кпк	n_e , см^{-3}	$\log Q_{\text{Ly}}, s^{-1}$ $(\log Q_{\text{min}}, \log Q_{\text{max}})$	$T_{\text{eff}}^{\text{V}}$, 10^3K	$\text{Sp.type}^{\text{V}}$	$T_{\text{eff}}^{\text{III}}$, 10^3K	$\text{Sp.type}^{\text{III}}$	$T_{\text{eff}}^{\text{V*}}$, 10^3K	$\text{Sp.type}^{\text{V*}}$
62	0.5±0.2	3.4±0.4	708.97	46.95(45.72,47.24)	—	—	—	—	28	B1/B0.5
63	3.8±1.5	10.3±0.4	199.74	48.54(47.41,48.82)	36	O9.5/O9	32	B0.5/B0	35	O8/O7.5
65	4.6±2.3	5.50±0.5	184.85	48.76(47.72,49.04)	37	O9/O8.5	32	B0/O9.5	37	O8/O7.5
68	1.6±1.0	8.9±0.6	597.45	48.62(47.49,48.90)	36	O9/O8.5	32	B0/O9.5	36	O8/O7.5
70	1.4±1.3	7.3±0.9	363.17	47.94(46.75,48.23)	32	B0.5/B0	—	—	32	O9/O8
71	1.0±0.9	6.2±0.9	786.50	48.10(46.92,48.39)	33	B0.5/B0	—	—	33	O9/O8
74	5.4±4.3	8.5±0.8	95.57	48.38(47.24,48.66)	35	O9.5/O9	31	B0.5/B0	34	O9/O8
75	4.2±2.5	13.2±0.6	73.67	48.00(46.73,48.29)	33	B0.5/B0	—	—	33	O9/O8
77	3.4±2.7	10.8±0.8	145.42	48.28(47.10,48.57)	—	—	—	—	31	B0/O9
78	4.7±2.4	11.8±0.5	175.81	48.59(47.42,48.88)	36	O9/O8.5	32	B0/O9.5	33	O9/O8
79	1.2±0.5	10.6±0.4	607.34	48.09(46.89,48.38)	33	B0.5/B0	—	—	33	O9/O8
80	5.1±2.6	10.1±0.5	102.72	48.52(47.40,48.80)	36	O9.5/O9	31	B0.5/B0	32	O9/O8
81	2.7±1.3	11.0±0.5	119.97	47.90(46.66,48.19)	32	B0.5/B0	—	—	32	B0/O9
82	2.7±1.4	10.8±0.5	266.81	48.49(47.36,48.77)	35	O9.5/O9	31	B0.5/B0	35	O9/O8
84	3.4±1.7	10.1±0.5	348.55	48.68(47.62,48.96)	—	—	—	—	32	B0/O9
85	1.6±0.9	11.5±0.6	676.56	48.38(47.20,48.67)	35	O9.5/O9	31	B0.5/B0	34	O9/O8
86	6.2±3.1	9.2±0.5	59.35	48.20(47.03,48.49)	34	B0/O9.5	—	—	33	O9/O8
88	0.4±0.2	4.2±0.6	895.04	47.13(45.89,47.42)	—	—	—	—	29	B0.5/B0
89	1.0±0.7	1.3±0.7	263.36	47.13(46.11,47.41)	—	—	—	—	29	B0.5/B0
91	8.7±7.2	11.3±0.6	79.53	48.75(47.61,49.04)	—	—	—	—	27	B1/B0.5
92	4.4±0.4	6.1±0.1	52.19	47.65(46.49,47.94)	—	—	—	—	31	B0/O9.5
93	5.9±0.6	6.1±0.1	53.62	48.27(47.17,48.55)	34	B0/O9.5	30	B0.5	33	O9/O8
94	1.0±2.2	6.0±2.2	537.61	47.69(46.54,47.98)	—	—	—	—	31	B0/O9.5
95	3.9±4.3	16.2±1.1	157.46	48.62(47.44,48.91)	36	O9/O8.5	32	B0/O9.5	36	O8/O7.5
96	5.5±5.5	5.8±1.0	52.62	48.05(46.93,48.33)	33	B0.5/B0	—	—	33	O9/O8
продолжение следует										

(продолжение)										
N°	S, пк	D , кпк	n_e , см^{-3}	$\log Q_{\text{Ly}}, s^{-1}$ $(\log Q_{\text{min}}, \log Q_{\text{max}})$	$T_{\text{eff}}^{\text{V}}$, 10^3K	Sp.type ^V	$T_{\text{eff}}^{\text{III}}$, 10^3K	Sp.type ^{III}	$T_{\text{eff}}^{\text{V}*}$, 10^3K	Sp.type ^{V*}
97	3.5 ± 2.4	10.2 ± 0.7	146.99	48.36(47.20,48.65)	34	B0/O9.5	30	B0.5/B0	34	O9/O8

Благодарности

Соискатель выражает благодарность своим коллегам и соавторам Д. Вибе, Я. Павлюченкову, М. Кирсановой, Т. Моляровой, А. Соболеву и В. Акимкину за помощь и плодотворное сотрудничество, а также благодарит Л. Андерсона и Ф. Буфано за конструктивную обратную связь и предоставление данных по потокам излучения для областей НП, рассчитанных в их работах.

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. *Bally J., Moeckel N., Throop H.* Evolution of UV-Irradiated protoplanetary disks // *Chondrites and the Protoplanetary Disk, ASP Conf. Ser.* — 2005. — V. 341. — Pp. 81–106.
3. *Kennicutt R. C.* Star formation in galaxies along the hubble sequence // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics.* — 1998. — V. 36. — Pp. 189–232.
4. *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.
5. *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.
6. *Russeil D.* Star-forming complexes and the spiral structure of our Galaxy // *Astronomy and Astrophysics.* — 2003. — V. 397. — Pp. 133–146 .
7. *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.

8. *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.
9. *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.
10. *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.
11. *Лозинская Т. А.* Взрывы звезд и звездный ветер в галактиках // *Изд. Москва: КРАСНОДАР*.—2012.—P. 216.
12. *Churchwell E., Povich M. S., Allen D. et al.* The bubbling Galactic disk // *The Astrophysical Journal*. — 2006. — V. 649. — Pp. 759–778.
13. *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.
14. *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.
15. *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.
16. *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.

17. *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.
18. *Tielens A. G. G. M.* Interstellar polycyclic aromatic hydrocarbon molecules // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2008. — V. 46. — Pp. 289–337.
19. *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.
20. *Топчиева А. П., Вубе Д. З., Кирсанова М. С., Крушинский В. В.* Морфология инфракрасного излучения в областях ионизованного водорода // *Астрономический Журнал*. — 2017. — V. 61, № 12. — Pp. 1015–1030.
21. *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.
22. *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.
23. *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.
24. *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.

25. *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.
26. *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.
27. *Sánchez-Cruces M., Castellanos-Ramírez A., Rosado M., RodríguezGonzález A., Reyes-Iturbide J.* Kinematics of the Galactic Bubble RCW 120 // *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica.* — 2018. — V. 54. — Pp. 375–388.
28. *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.
29. *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.
30. *Helfand D. J., Becker R. H., White R. L., Fallon A., Tuttle S.* MAGPIS: A Multi-Array Galactic Plane Imaging Survey // *Astron. J.* — 2006. — V. 131. — Pp. 2525–2537.
31. *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.
32. *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.

33. *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.
34. *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.
35. *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.
36. *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.
37. *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.
38. *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.
39. *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.

40. *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.
41. *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.
42. *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.
43. *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.
44. *Kruegel E.* The physics of interstellar dust // *IoP Series in astronomy and astrophysics, ISBN 0750308613. Bristol, UK: The Institute of Physics.* — 2003. Ред. Endrik Kruegel.
45. *Mathis J. S.* The effects of dust in H II regions // *Astronomical Society of the Pacific, Publications (ISSN 0004-6280).* — 1986. — V. 98. — Pp. 995–998.
46. *Akimkin V. V., Kirsanova M. S., Pavlyuchenkov Ya. N., Wiebe D. S.* Dust dynamics and evolution in H II regions - II. Effects of dynamical coupling between dust and gas // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2017. — V. 469. — Pp. 630–638.
47. *Murga M. S., Khoperskov S. A., Wiebe D. S.* The evolution of hydrocarbon dust grains in the interstellar medium and its influence on the infrared spectra of dust // *Astronomy Reports.* — 2016. — V. 60. — Pp. 669–681.

48. *Gvaramadze V. V., Kniazev A. Y., Hamann W. R., Berdnikov L. N., Fabrika S., Valeev A. F.* A new Wolf-Rayet star and its circumstellar nebula in Aquila // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2010. — V. 403. — Pp. 760–767.
49. *Fazio G. G., Hora J. L., Allen L. E.* et al. The infrared array camera (IRAC) for the Spitzer Space Telescope // *Astrophys. J. Supp.* — 2004. — V. 154. — Pp. 10–17.
50. *Rieke G. H., Young E. T., Engelbracht C. W.* et al. The Multiband Imaging Photometer for Spitzer (MIPS) // *Astrophys. J. Supp.* — 2004. — V. 154. — Pp. 25–29.
51. *Bania T. M., Anderson L. D., Balser D. S.* The arecibo H II region discovery survey // *The Astrophysical Journal*. — 2012. — V. 759. Issue 2, article id. 96. — P. 14.
52. *Simpson R. J., Povich M. S., Kendrew S.* et al. The Milky Way Project First Data Release: a bubblier Galactic disc // *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* — 2012. — V. 424. — Pp. 2442–2460.
53. *Beaumont C. N., Williams J. P.* Molecular Rings Around Interstellar Bubbles and the Thickness of Star-Forming Clouds // *Astrophys. J.* — 2010. — V. 709. — Pp. 791–800.
54. *Deharveng L., Zavagno A., Samal M. R.* et al. Bipolar H II regions - Morphology and star formation in their vicinity. I. G319.88+00.79 and G010.32-00.15 // *Astron. and Astrophys.* — 2015. — V. 582. Id.A1. — P. 33.
55. *Hattori Y., Kaneda H., Ishihara D.* et al. Mid- and far-infrared properties of Spitzer Galactic bubbles revealed by the AKARI all-sky surveys // *Proc. Astron. Soc. Jap.* — 2016. — V. 68. Issue 3, id. 37. — P. 41.

56. *Furukawa N., Dawson J. R., Ohama A. et al.* Molecular clouds toward RCW49 and westerlund 2: evidence for cluster formation triggered by cloud-cloud collision // *Astrophys. J. Lett.* — 2009. — V. 696. — Pp. L115–L119.
57. *Andrews H., Boersma C., Werner M. W., Livingston J., Allamandola L. J., Tielens A. G. G. M.* PAH emission at the bright locations of PDRs: the grandPAH hypothesis // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — V. 807. Issue 1, article id. 99. — P. 24.
58. *Paladini R., Umana G., Veneziani M. et al.* Spitzer and Herschel multiwavelength characterization of the dust content of evolved H II regions // *The Astrophysical Journal*. — 2012. — V. 760. Issue 2, article id. 149. — P. 25.
59. *Aniano G., Draine B. T., Gordon K. D., Sandstrom K.* Common-resolution convolution Kernels for space- and ground-based telescopes // *Publications of the Astronomical Society of Pacific*. — 2011. — V. 123. — Pp. 1218–1236.
60. *Madden S. C., Galliano F., Jones A. P., Sauvage M.* ISM properties in low-metallicity environments // *Astronomy and Astrophysics*. — 2006. — V. 446. — Pp. 877–896.
61. *Lebouteiller V., Brandl B., Bernard-Salas J., Devost D., Houck J. R.* PAH strength and the interstellar radiation field around the massive young cluster NGC 3603 // *The Astrophysical Journal*.—2007.—V. 665.—Pp. 390–401.
62. *Smirnova K. I., Wiebe D. S., Moiseev A. V.* Star-forming complexes in the polar ring galaxy NGC660 // *Open Astronomy*. — 2017. — V. 26. — Pp. 88–92.
63. *Draine B. T., Dale D. A., Bendo G. et al.* Dust masses, PAH abundances, and starlight intensities in the SINGS Galaxy sample // *Astrophysical Journal*. — 2007. — V. 663. — Pp. 866–894.

64. *Condon J. J.* Radio emission from normal galaxies // *Annual review of astronomy and astrophysics*. — 1992. — V. 30. — Pp. 575–611.
65. *Dirienzo W. J., Indebetouw R., Brogan C., Cyganowski C. J., Churchwell E. B., Rachel K.* Testing triggered star formation in six H II regions // *The Astronomical Journal*. — 2012. — V. 144. Issue 6, article id. 173. — P. 26.
66. *Osterbrock, D. E., Ferland, G. J.* Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei // *2nd. ed. by D.E. Osterbrock and G.J. Ferland. Sausalito, CA: University Science Books*. — 2006.
67. *Tielens A. G. G. M.* The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium // *Cambridge, UK: Cambridge University Press, book*. — 2005.
68. *Anderson L. D., Deharveng L., Zavagno A. et al.* Mopra CO observations of the bubble H II region RCW 120 // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — V. 800. Issue 2, article id. 101. — P. 11.
69. *Vacca W. D., Garmany C. D., Shull J. M.* The lyman-continuum fluxes and stellar parameters of O and Early B-type stars // *Astrophysical Journal*. — 1996. — V. 460. — Pp. 914–931.
70. *Smith L. J., Norris R. P. F., Crowther P. A.* Realistic ionizing fluxes for young stellar populations from 0.05 to 2 Zsolar // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2002. — V. 337. — Pp. 1309–1328.
71. *Alexeeva S. A., Sobolev A. M., Gorda S. Yu., Yushkin M. V., McSwain V.* Orbital and physical parameters of the spectroscopic binary HD37737 // *Astrophysical Bulletin*. — 2013. — V. 68. — Pp. 169–176.
72. *Walborn N. R.* Some spectroscopic characteristics of the OB stars: an investigation of the space distribution of certain OB stars and the reference

- frame of the classification // *Astrophysical Journal Supplement*. — 1971. — V. 23. — Pp. 257–282.
73. *Walborn N. R.* Spectral classification of OB stars in both hemispheres and the absolute-magnitude calibration. // *Astronomical Journal*. — 1972. — V. 77. — Pp. 312–318.
74. *Avedisova V. S.* Catalogue of observational data in galactic star-forming regions // *Soviet Astronomy* — 1979. — V. 23. — Pp. 544–547.
75. *Panagia N., Walmsley C. M.* Radio source angular diameters // *Astronomy and Astrophysics*. — 1978. — V. 70. — Pp. 411–414.
76. *Topchieva A. P., Wiebe D. S.* Connection between Galactic HII regions and extragalactic star forming complexes // *INASAN Science Reports*. — 2019. — V. 4. — Pp. 21–26.
77. *Becker R. H., White R. L., Helfand D. J., Zoonematkermani S.* A 5 GHz VLA Survey of the Galactic Plane // *Astrophysical Journal Supplement Series*. — 1994. — V. 91. — Pp. 347–387.
78. *Urquhart J. S., Hoare M. G., Lumsden S. L.* et al. The RMS survey. H₂O masers towards a sample of southern hemisphere massive YSO candidates and ultra compact HII regions // *Astron. and Astrophys.* — 2009. — V. 507. — Pp. 795–802.
79. *Egan M. P., Price S. D., Kraemer K. E.* et al. VizieR Online Data Catalog: MSX6C Infrared Point Source Catalog. The Midcourse Space Experiment Point Source Catalog Version 2.3 (October 2003) // *VizieR Online Data Catalog*. — 2003. — V. 114. Originally published in: Air Force Research Laboratory Technical Report AFRL-VS-TR-2003-1589.

80. *Topchieva A., Akimkin V. and Smirnov-Pinchukov G.* Infrared photometric properties of inner and outer parts of HII regions // *Research in Astronomy and Astrophysics*. — 2019. — V. 19, № 10. — Pp. 148–156.
81. *Xie Y., Ho L. C.* A New Calibration of Star Formation Rate in Galaxies Based on Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emission // *The Astrophysical Journal*. — 2019. — V. 884, Issue 2, article id. 136. — P. 10.
82. *Bakes E. L. O. and Tielens A. G. G. M.* The Photoelectric Heating Mechanism for Very Small Graphitic Grains and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons // *Astrophysical Journal*. — 1994. — V. 427. — Pp. 822–838.
83. *Mathis J. S., Mezger P. G., Panagia N.* Interstellar radiation field and dust temperatures in the diffuse interstellar matter and in giant molecular clouds // *Astronomy and Astrophysics*. — 1983. — V. 500. — Pp. 259–276.
84. *Hollenbach D.* The Heating of Interstellar Gas by Dust // *Interstellar Dust: Proceedings of the 135th Symposium of the International Astronomical Union, held in Santa Clara, California, 26-30 July 1988. Edited by Louis J. Allamandola and A. G. G. M. Tielens*. — 1989. — Pp. 227–238.
85. *Topchieva A. P.* Comparison of HII regions radiation fluxes from different catalogs // *A.A. Boyarchuk Memorial Conference*. — 2018. — V. 1. — Pp. 312–316.
86. *Malkov, O. Y.* Mass-luminosity relation of intermediate-mass stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2007. — V. 382. — Pp. 1073–1086.
87. *Weingartner J. C. and Draine B. T.* Dust Grain-Size Distributions and Extinction in the Milky Way, Large Magellanic Cloud, and Small Magellanic Cloud // *Astrophysical Journal*. — 2001. — V. 548. — Pp. 296–309.

88. *Compigne M., Verstraete L., Jones A. et al.* The global dust SED: tracing the nature and evolution of dust with DustEM // *Astronomy and Astrophysics* — 2011. — V. 525. — Pp. A103(1–14).
89. *Murgac M. S., Wiebe D. S., Sivkova E. E. and Akimkin V. V.* SHIVA: a dust destruction model // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — V. 488. — Pp. 965–977.