

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Уральский федеральный
университет».

На правах рукописи

Ладейщиков Дмитрий Антонович

**Исследование пространственно-кинематической
структуры гигантских молекулярных облаков**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
к.ф.-м.н. Соболев А.М.

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования “Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина”

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, Астрономическая обсерватория УрФУ, г. Екатеринбург / Исполняющий обязанности директора, заведующий отделом астрофизики и физики Солнца,
Соболев Андрей Михайлович

Официальные оппоненты: **Вибе Дмитрий Зигфридович,** доктор физико-математических наук, Институт астрономии Российской академии наук, г. Москва / Заведующий отделом физики и эволюции звезд

Алакоз Алексей Валерьевич, кандидат физико-математических наук, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук, г. Москва / Заведующий лабораторией спектральной радиоастрономии Астрокосмического центра ФИАН

Ведущая организация: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (Государственный Астрономический Институт им. П.К. Штернберга), г. Москва.

Защита состоится «14» сентября 2016 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: Москва, ул. Профсоюзная 84/32, Институт космических исследований РАН, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Ленинский проспект, дом 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайте ФИАН <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе "Диссертационный совет".

Автореферат разослан «___» _____ 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Ю. А. Ковалев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Основная часть звезд в Галактике рождается в гигантских молекулярных облаках (ГМО), поэтому исследование особенностей пространственно-кинематической структуры ГМО необходимо для изучения особенностей звездообразования в Галактике. Наличие большого числа молекул в межзвездной среде дает богатые возможности для анализа физических условий и химического состава ГМО. Согласно исследованиям из работы [1], процессы звездообразования происходят в первую очередь в местах повышенной концентрации газа, главная компонента которого – молекулярный водород. Молекулярный газ распределен в Галактике неравномерно, причем он сконцентрирован в различные иерархические структуры – гигантские молекулярные облака, молекулярные облака, волокна, молекулярные сгустки, ядра и др. Исследование данных структур позволяет сделать выводы о протекающих в них процессах звездообразования. Ставятся следующие вопросы: каким образом возникли наблюдаемые комплексы звездообразования, каковы их морфология и кинематика, как взаимодействуют между собой различные составляющие, каковы их основные физические характеристики (масса, плотность, температура), при каких условиях возникают и как протекают процессы звездообразования, каковы основные свидетельства их активности в данный момент, какие звезды в них образуются и каким образом они влияют на окружающее межзвездное вещество.

Эффективным методом получения наблюдательных данных о кинематике и физической структуре облаков молекулярного газа является картографирование в радиолиниях. Для этой цели могут быть использованы линии различных молекул, выступающие в качестве индикаторов тех или иных процессов и условий, возникающих в межзвездной среде. В частности, линии молекулы СО используются для изучения общего распределения молекулярного газа. Линии молекулы аммиака (NH_3) являются индикаторами температуры и повышенной плотности газа, а линии молекулы цианоацетилена (HC_3N) являются индикаторами областей еще более высоких плотностей. Мазерные линии метанола (CH_3OH) I класса дают возможность обнаружения ударных фронтов в межзвездной среде, характерных для истечений из молодых звездных объектов. Вместе данная информация позволяет отождествить места активного звездообразования, а также произвести приблизительную оценку их физических и химических характеристик.

В настоящее время накоплен богатый наблюдательный материал, позволяющий производить исследования областей образования звезд. Вместе с этим идет развитие численных методов крупномасштабного галактического моделирования с учетом различных физических процессов. Модели, представленные в последних работах (см. к примеру работы [2,3]) зачастую показывают расхождение теоретических результатов с данными наблюдений. Рассогласование объясняется не только особенностями моделирования (к примеру, учет обратной связи от звезд и других факторов), но и разницей методов выделения облаков. Поэтому сопоставление данных наблюдений и моделирования всегда связано с поиском общей методики для анализа данных, которая одинаково хорошо подойдет как для данных моделирования, так и для данных наблюдений.

Результатом наблюдений в радиолиниях в случае исследования крупномасштабных газовых структур являются «кубы данных», в которых две оси являются пространственными, а третья ось – кинематическая, соответствующая лучевой скорости объектов. В настоящий момент разработаны различные методы анализа данных пространственно-кинематической структуры (например, методы Clumpfind [4], GaussClump [5], FellWalker [6] и др.). Эти методы позволяют выделять различные структуры в «кубах данных», которые затем могут быть проанализированы статистически для определения основных физических характеристик этих структур – масс, светимостей, дисперсий лучевых скоростей и др. Именно на основании этих характеристик возможно сравнение данных моделирования и наблюдений. Данные структуры также являются кандидатами в области звездообразования.

Исследование областей звездообразования – актуальная и активно развивающаяся область в астрофизике. Связь этой области исследования с анализом крупномасштабной структуры гигантских молекулярных облаков обуславливается тем, что звездообразование в первую очередь происходит в местах скопления молекулярного газа, то есть в молекулярных облаках. Образование звезд может начинаться как спонтанно, так и под воздействием внешних факторов. Стимулированное звездообразование – один из наиболее эффективных процессов звездообразования в Галактике и за ее пределами. В настоящий момент принята точка зрения, что стимулированное звездообразование протекает по двум основным сценариям – «сжатие существующего сгустка» и «сбор-и-сжатие». Следует отметить, что источником энергии для данных сценариев могут быть различные процессы, в том числе взрывы сверхновых, расширения зон HII, столкновения облаков молекулярного газа и иные причины.

Цели и задачи исследования

Целью настоящей диссертационной работы является исследование пространственно-кинематической структуры гигантских молекулярных облаков на основании данных наблюдений и моделирования в линиях CO, NH₃, CH₃OH, HC₃N. Решение поставленной задачи включает в себя:

1. Рассмотрение основных методов анализа пространственно-кинематической структуры гигантских молекулярных облаков (ГМО).
2. Применение различных методов анализа структуры ГМО для данных моделей и наблюдений и исследование особенностей различных методов анализа структуры ГМО.
3. Исследование основных физических характеристик ГМО на основании данных наблюдений и моделирования в линии CO.
4. Исследование ГМО в различных линиях молекул межзвездной среды (CO, NH₃, CH₃OH и HC₃N и др.) для выяснения их физического состояния.
5. Исследование особенностей индуцированного звездообразования в ГМО.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Анализ пространственно-кинематической структуры молекулярного облака в области S233, позволивший выделить изолированный сгусток молекулярного газа, совпадающий по положению с инфракрасным источником, содержащим компактное ядро и оболочечную структуру. По результатам анализа установлено, что в данной области звездообразование возможно по сценарию «сжатие ранее существующего сгустка» (collapse of the pre-existing clump).
2. Оценки физических параметров молекулярных сгустков в гигантском молекулярном облаке G174+2.5 по линиям молекул CO и NH₃. По линии CO были определены размеры, лучевые концентрации и массы молекулярных сгустков. Массы сгустков по данным CO находятся в диапазоне 700-2000 M_{\odot} . По линии NH₃ определены температуры и концентрации газа в молекулярных сгустках. Установлено, что значения температуры и концентрации молекулярного газа лежат в пределах 16–30 К и $2.8\text{--}7.2 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$, соответственно.

3. Наблюдения на радиотелескопе РТ-22 гигантского молекулярного облака G174+2.5 в линиях CH_3OH , HC_3N и NH_3 в направлениях на сгустки, наиболее яркие в линии молекулы CO . По результатам наблюдений линия CH_3OH на частоте 36.2 ГГц, которая трассирует ударные фронты в межзвездной среде, была зарегистрирована впервые в направлении на молекулярный сгусток WB89 673. Получены новые регистрации линий HC_3N и NH_3 в направлении на молекулярные сгустки WB89 673 и WB89 668, что указывает на высокую плотность вещества в них.
4. Исследование статистических закономерностей гигантских молекулярных облаков в различных теоретических моделях галактик при использовании метода выделения облаков по излучению CO методом Clumpfind [7].

Научная новизна результатов

1. Впервые исследована пространственно-кинематическая структура молекулярного облака в области звездообразования S233. На основании архивных данных в инфракрасной области, а также собственных данных по излучению в линии CO и оптическим спектрам была исследована ионизирующая звезда, оптическая туманность, молекулярный газ и пыль в области S233. На основании полученных данных был исследован сценарий звездообразования в области S233.
2. Впервые получены данные о физических характеристиках молекулярных сгустков в направлении на области звездообразования S231-S235 по линиям CO и NH_3 . Открыты новые источники излучения в линиях CH_3OH , HC_3N и NH_3 в направлении на молекулярные сгустки из комплекса звездообразования S231-S235.
3. Для радиотелескопа РТ-22 ФИАН была разработана система автоматизации для двухканального радиометра диапазона 8 мм. Разработанная система автоматизации управляет двухканальным радиометром диапазона 8 мм, который позволяет вдвое увеличить эффективность наблюдений по сравнению с одноканальным радиометром благодаря возможности одновременного наблюдения двух спектральных линий в диапазоне 34-38 ГГц. Система успешно применена для исследования областей звездообразования комплекса S231-S235 в линиях CH_3OH и HC_3N . *Данный результат на защиту не выносится.*

4. Впервые проведен анализ статистических характеристик молекулярных облаков в моделях галактик для различных методов выделения структур в молекулярных облаках, в том числе с применением алгоритма Clumpfind [7] для моделей дисковых галактик с различной морфологией. Установлено, что способ выделения молекулярных облаков влияет на оценки их основных физических характеристик – массы, светимости и дисперсии скоростей на луче зрения. Исследовано влияние методов выделения на статистические характеристики (соотношения Ларсона) молекулярных облаков.

Практическая значимость

Полученные данные о молекулярных сгустках в направлении на области звездообразования S231-S235 по линиям CO и NH₃ составляют основу знаний о физических характеристиках молекулярных сгустков в ГМО. Полученные новые регистрации линий NH₃ и HC₃N в источниках WB89 673 и WB89 668 указывают на присутствие вещества с высокой плотностью, что составляет основу для будущих исследований процессов звездообразования в этих объектах, к примеру, при помощи субмиллиметрового радиотелескопа APEX (Atacama Pathfinder Experiment) и 20-метрового радиотелескопа обсерватории Онсала. По линии CO определены размеры, лучевые концентрации и массы молекулярных сгустков. По линии NH₃ определены температуры и концентрации газа в молекулярных сгустках. Установлено, что значения температуры и концентрации молекулярного газа лежат в пределах 16-30 К и $2.8-7.2 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$, соответственно. Линия CH₃OH на частоте 36.2 ГГц, которая трассирует ударные фронты в межзвездной среде, в источнике WB89 673 была зарегистрирована впервые. Значимость данного результата заключается в том, что физические параметры молекулярных сгустков и особенности звездообразования в объектах S231-S235 составляют основу исследований физического статуса ГМО в Галактике.

На радиотелескопе РТ-22 ФИАН была разработана система автоматизации для двухканального радиометра диапазона 8 мм, на котором были впервые исследованы области звездообразования S231-S235. Новый радиометр позволяет одновременно получать две спектральные линии в диапазоне 34-38 ГГц, что увеличивает эффективность наблюдений вдвое по сравнению с одноканальным радиометром. Прделанная работа доказывает возможность использования нового двухканального радиометра РТ-22 диапазона 8 мм для исследований областей звездообразования. *Данный результат на защиту не выносятся.*

Впервые исследована пространственно-кинематическая структура молекулярного облака в области звездообразования S233. Установлено, что в данной области наблюдается довольно редкий класс объектов – одиночная В-звезда главной последовательности, которая влияет своим ударно-ионизационным фронтом на окружающий молекулярный газ и показывает признаки активного звездообразования на своей границе. Эти данные важны для развития теории ранних фаз индуцированного звездообразования.

Алгоритм Clumpfind [7] был впервые применен для анализа данных гидродинамического моделирования дисковых галактик, что позволило сравнить результаты моделирования с данными наблюдений, в которых применение алгоритма Clumpfind является стандартной процедурой. Эта методика может с успехом применяться в будущем.

Достоверность результатов

Достоверность исследования пространственно-кинематической структуры молекулярного облака в области S233 при помощи радиотелескопов FCRAO и SMT, подтверждается тем, что в ходе исследования были использованы апробированные методики проведения наблюдений и обработки результатов, а также участием в работе в качестве соавтора Джона Бигинга – опытного наблюдателя на радиотелескопе SMT, при участии которого опубликовано более 250 работ.

Достоверность полученных данных с PT-22 обеспечена тем, что в ходе исследования были использованы апробированные методики проведения наблюдений и обработки результатов, а также соответствием полученных наблюдаемых характеристик спектральных линий в тестовых объектах результатам предыдущих наблюдений на PT-22 и результатам наблюдений на других радиотелескопах в работах [8–13].

Достоверность исследования статистических закономерностей гигантских молекулярных облаков в моделях дисковых галактик подтверждается тем, что в ходе исследования были использованы апробированные методы расчета и анализа, а также соответствием физических характеристик облаков в моделях характеристикам облаков по результатам наблюдений [14–17].

Личный вклад автора в совместные работы

Основные результаты диссертации опубликованы в 3 статьях [A1-A3] в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК, в том числе две статьи опубликованы в высокорейтинговом зарубежном журнале

(MNRAS). Все статьи, лежащие в основе настоящей работы, написаны в соавторстве, причем вклад диссертанта в работы [A1,A2] является определяющим.

Автор диссертации лично провел следующие работы:

- В работе [A1] автор обрабатывал и анализировал инфракрасные данные с космических и наземных телескопов WISE, UKIDSS и IRAS, а также оригинальные данные по излучению в линиях CO, полученные на радиотелескопах SMT и FCRAO, проведенные и предоставленные по заявке Астрономической Обсерватории УрФУ. Автор произвел оценку физических параметров молекулярного и инфракрасного сгустков, исследовал особенности звездообразования в области S233 и написал основной текст работы.
- В работе [A2] автор отобрал источники для наблюдений, принял участие в установке на радиотелескоп PT-22 двухканального радиометра диапазона 8 мм, на котором производились наблюдения, разработал и внедрил систему автоматизации для двухканального радиометра. Автор самостоятельно разработал программу наблюдений, провел наблюдения на PT-22 за несколько сессий в 2012, 2013 и 2015 годах, обработал полученные спектры, определил физические параметры молекулярных сгустков по линиям CO, исследовал особенности звездообразования в молекулярных сгустках по полученным молекулярным линиям и написал основной текст работы.
- В работе [A3] автор занимался выделением молекулярных облаков из моделей дисковых галактик методом CLUMPFIND [4], а также рассчитывал физические характеристики выделенных облаков. Диссертант также принимал участие в составлении статистических закономерностей, обсуждении результатов и содержания текста статьи.

Апробация результатов

Все основные результаты и положения, выносимые на защиту, докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- 1) Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2010) «От эпохи Галилея до наших дней», 13 – 18 сентября 2010 г., Нижний Архыз.
- 2) Школа-семинар «Физико-Химические процессы в межзвездной среде», 1 – 6 сентября 2011 г., Волгоград.

- 3) 41-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», 30 января – 3 февраля 2012 г., Екатеринбург.
- 4) Семинар Пушинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН «Первые наблюдения с двухканальным радиометром», 2012 г., Пушино.
- 5) Международная конференция «XLII Young European Radio Astronomers Conference» (YERAC 42), 18 – 21 сентября 2012 г., Пушино.
- 6) 42-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», 28 января – 1 февраля 2013 г., Екатеринбург.
- 7) Международная конференция «Star Formation Across Space and Time», 11 – 14 ноября 2014 г., Нордвайк, Нидерланды.
- 8) 45-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», 1 – 5 февраля 2016 г., Екатеринбург.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из Введения, четырех глав, Заключения. Объем работы: 162 страницы, 34 рисунка и 11 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 233 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** представлена общая характеристика диссертационной работы и ее актуальность.

В **Главе 1** приводится литературный обзор по теме исследования структуры гигантских молекулярных облаков (ГМО), в том числе в разделе 1.1 рассматриваются общие сведения о молекулах, которые используются для исследования ГМО. В разделе 1.2 представлен литературный обзор по особенностям областей звездообразования, а в разделе 1.3 рассматривается один из наиболее эффективных процессов звездообразования – индуцированное звездообразование. Статистические характеристики ГМО, в том числе соотношения Ларсона [14] описаны в разделе 1.4. Часто результаты наблюдений и численного моделирования представляются в виде «кубов данных» излучения в линиях различных молекул, поэтому в разделе 1.5

описывается различные методы и алгоритмы для анализа структур в «кубах данных», в том числе – методы CLUMPFIND, GASSCLUMP, FELLWALKER, REINHOLD, GETFILAMENTS и др. Сами эти методы ничего не говорят о физических характеристиках выделенных структур, но результаты выделения облаков позволяют построить модель переноса излучения и вывести их основные физические характеристики, чему полностью посвящен раздел 1.6. В данном разделе представлены соотношения для оптических толщин различных разновидностей линий молекулы CO (раздел 1.6.1), теоретическая модель профиля линии молекулы CO (раздел 1.6.2), а также основные соотношений для определения физических характеристик молекулярных облаков (разделы 1.6.3-1.6.5), в том числе – лучевой концентрации водорода, оптической толщины, массы газа и др. Данные соотношения были использованы для определения физических параметров молекулярных облаков по данным наблюдений и моделирования в работах [A2,A3].

В **Главе 2** рассмотрены особенности звездообразования в области S233, которая является частью гигантского молекулярного облака G174+2.5. Для анализа пространственно-кинематической структуры молекулярного облака в области S233 были использованы наблюдения в линии CO на телескопах SMT и FCRAO, полученные по заявкам Астрономической Обсерватории УрФУ. Автор работы не принимал участия в наблюдениях, а занимался только обработкой данных. Для определения параметров ионизирующей звезды области H II в S233 использованы оптические спектры высокого разрешения, полученные на телескопе БТА [A1**]. Техническое описание данных приведено в разделе 2.2. При помощи этих спектров был определен спектральный класс звезды B0.5 V и лучевая скорость -17.5 ± 1.4 км с⁻¹. Данное значение согласуется с системной скоростью газа в окрестности области S233, что предполагает возможность рождения звезды в ближайшем молекулярном облаке.

Раздел 2.3 посвящен анализу области S233 в оптическом, ближнем и дальнем инфракрасных диапазонах. В районе туманности S233 наблюдается ряд пиков яркости. Согласно данным UKIDSS, на инфракрасном изображении выделяются ярко выраженные структуры в виде оболочек, расположенных перпендикулярно к ионизирующей звезде. Вдоль этих структур выделяются поярчения S1, S2 и S3. В окрестности области S233 располагается также IRAS-источник 05351+3549. Важно отметить, что плотность потока возрастает с длиной волны, что характерно для молодых звездных объектов, согласно работе Коннелли и др. [18]. Массы излучающей пыли источника IRAS 05351+3549 составляет $70 M_{\odot}$ при использовании значении отношения газа к пыли 0.01 из работы Дрэйна и др. [19].

В разделе 2.4 исследуется пространственно-кинематическая структура молекулярного облака в области S233 по линиям CO. Согласно [A3], взаимодействие зоны Н II с молекулярным облаком, вероятно, наблюдается на лучевых скоростях от -16.1 до -14.5 км с⁻¹. На этих скоростях проявляется нерегулярная граница излучения CO вокруг центральной ионизирующей звезды, которая может быть физически связана с областью ионизованного водорода.

В разделе 2.4.2 показано, что в области S233 имеется изолированный молекулярный сгусток, который излучает в линии ¹²CO и имеет красное смещение относительно родительского облака. Излучение сгустка видно в трех разновидностях линии CO, однако его излучение довольно слабое и достигнутый уровень шума не позволяет произвести анализ переноса излучения с использованием трех линий одновременно. Используя полученное из наблюдений отношение антенных температур линий T_{12}/T_{13} и используя численное решение уравнения переноса излучения, установлено, что оптическая толщина линии ¹²CO(2-1) для сгустка находится в пределах от 3.3 до 6.6. Это показывает, что линия молекулы ¹²CO является оптически толстой.

В разделе 2.5.1 обсуждается морфология зоны Н II в области S233. На изображениях UKIDSS и WISE сгусток газа совпадает по положению с инфракрасным источником, который содержит в себе компактный объект и яркую оболочку. Данная оболочка располагается перпендикулярно направлению к ионизирующей звезде. Компактный источник совпадает по положению с источником IRAS 05351+3549. Все эти свидетельства указывают на возможность индуцированного звездообразования в области S233. Данная возможность в разделе 2.5.2 исследована в рамках одномерной теоретической модели. Анализ результатов расчетов показал (см. работу [A3]), что сценарий «сбор-и-сжатие» в области S233 может действовать только в том случае, если средняя плотность газа имеет значение $n_0 \simeq 4 \cdot 10^4$ см⁻³. В данной работе мы не можем оценить плотность газа по имеющимся данным, однако в ближайшей области звездообразования S233-IR средняя плотность достигает значения ≈ 7200 см⁻³ (см. Таблицу 4 из работы [A2]). Поэтому значение $4 \cdot 10^4$ см⁻³ – слишком велико для средней плотности газа в области Н II S233. Следовательно, сценарий «сбор-и-сжатие» скорее всего не реализуем в области S233. Наличие яркой оболочечной структуры и компактного инфракрасного источника в области S233 указывает на тип звездообразования «сжатие ранее существовавшего сгустка». Один из признаков данного сценария – наличие ярких инфракрасных оболочек рядом с глобулами и поярчениями, подробно рассмотренными в

работе Томпсона и др. [20]. Звездообразование может происходить внутри этих глобул. Выводы описаны в разделе 2.6.

Глава 3 посвящена изучению областей звездообразования S231-S235 в радиолиниях молекул межзвездной среды – монооксида углерода (CO), аммиака (NH₃), цианоацетилена (HC₃N) и мазерных линиях метанола (CH₃OH) и водяного пара (H₂O). Области S231-S235 входят в гигантское молекулярное облако G174+2.5. Целью проделанной работы является поиск новых источников излучения в направлении на молекулярные сгустки и оценка их физических параметров по линиям молекул CO и NH₃.

Для выполнения поставленной задачи автор выполнил наблюдения областей звездообразования S231-S235 на радиотелескопе РТ-22 ФИАН. Для осуществления программы наблюдений на длине 8 мм автором была разработана (см. работы [B4, B5]) система автоматизации двухканального радиометра диапазона 8 мм, который является развитием штатного одноканального радиометра диапазона 8 мм РТ-22 ФИАН, чему посвящен раздел 3.1. С помощью разработанной системы были проведены наблюдения плотных молекулярных сгустков из областей звездообразования S231-S235 (см. работу [A2]) в линиях молекул межзвездной среды. Сгустки были предварительно выделены по критерию, связанному с наличием IRAS-источников в близости от пиков излучения в линии ¹³CO, как описано в разделе 3.3. В результате такого анализа были визуально отобраны 10 молекулярных сгустков. Практически всем сгусткам соответствуют молодые звездные скопления по данным обзоров неба в инфракрасном диапазоне *Wide-Field Infrared Survey Explorer* (WISE, [21]) и *UKIRT Infrared Deep Sky Survey* (UKIDSS, [22]). Данные сгустки выбраны для наблюдений в линиях CH₃OH, NH₃ и HC₃N. Для выделения молекулярных сгустков в линии ¹³CO был использован алгоритм GaussClump [5], который был ранее подробно описан в разделе 1.5.

В разделе 3.4 описаны собственные наблюдательные данные с радиотелескопа РТ-22, а также архивные данные по линии CO. Результаты наблюдений описаны в разделе 3.5.2. По результатам наблюдений получены новые регистрации линий NH₃ и HC₃N в источниках WB89 673 и WB89 668, что указывает на присутствие вещества с высокой плотностью. Линия CH₃OH на частоте 36.2 ГГц, которая трассирует ударные фронты в межзвездной среде, в источнике WB89 673 была зарегистрирована впервые.

В разделе 3.5.1 по линии CO были определены размеры, лучевые концентрации и массы молекулярных сгустков. Согласно выводам из работы [A2], лучевая концентрация молекулярного водорода в направлении на сгустки находится в диапазоне от $1.45 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ в WB 690 до $4.21 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ в S235 East 1. Масса сгустков по данным CO находится в диапазоне от

733 M_{\odot} в WB89 690 до 2112 M_{\odot} в WB89 673. Некоторые молекулярные сгустки в линии CO имеют сложную протяженную структуру, которая не может быть точно описана алгоритмом GaussClump, в котором предполагается гауссово распределения яркости.

В разделе 3.5.3 по линии NH_3 были определены температуры и плотности молекулярных сгустков. Методика определения физических параметров газа по линиям аммиака представлена подробно в работе [A2**]. Для определения температуры и плотности газа в предположении локального термодинамического равновесия (ЛТР) было использовано отношение антенной температуры главной компоненты спектра NH_3 к антенной температуре спутеллитных компонент сверхтонкой структуры спектра, а также отношение главных компонент переходов $\text{NH}_3(J, H) = (1, 1)$ и $(2, 2)$. Для оценки размеров источников в линии NH_3 были использованы данные по излучению в континууме на длине волны 1.1 мм из обзора Volocam [23]. В результате применения данной методики были получены значения лучевой концентрации аммиака (N_{NH_3}), кинетической температуры (T_{kin}) и концентрации молекулярного газа (n_{H_2}). Установлено, что концентрация молекулярного газа в направлении на сгустки WB89 673, WB89 668, S233-IR, G173.57+2.43 и S235-AB лежит в диапазоне от 2.8 до $7.2 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$. Кинетическая температура для сгустков WB89 668, WB89 673 и G173.57+2.43 примерно одинакова и составляет 14-16 K, а для S233-IR и S235-AB она составляет 27-30 K.

В разделе 3.6.1 обсуждается распределение плотного газа и вириальная устойчивость молекулярных сгустков. Обычно предполагается, что, если вириальный параметр $\alpha_{\text{vir}} > \alpha_{\text{cr}}$, тогда сгусток или молекулярное облако является гравитационно стабильным. Если $\alpha_{\text{vir}} \lesssim \alpha_{\text{cr}}$, тогда возмущения давления и плотности сгустка могут привести к гравитационному сжатию вещества и запуску процессов звездообразования. Для изотермических сгустков с массой Джинса без учета магнитных полей $\alpha_{\text{cr}} \simeq 2$. [24, 25]. Установлено, что во всех рассматриваемых сгустках $\alpha_{\text{vir}} \lesssim 2$, что означает их гравитационную неустойчивость.

В разделе 3.6.2 исследуются молодые звездные скопления в направлении на исследуемые молекулярные сгустки. Установлено, что в направлении на все рассматриваемые молекулярные сгустки кроме G173.17+2.55 выделяются молодые звездные скопления, в том числе S235 Central, S235 East1, S235 East2, S235-AB, S232-IR, S233-IR, G173.57+2.43, WB89 673 и WB89 668. Наличие молодых звездных скоплений указывает на активные процессы звездообразования в данных молекулярных сгустках.

В разделе 3.6.3 обсуждаются истечения в молекулярных сгустках. Основной критерий наличия истечений – излучение в линии метанола I класса и в линии SiO, которые трассируют ударные волны в межзвездной среде. Признаки молекулярных истечений обнаруживаются в следующих массивных сгустках: WB89 690, WB89 668, WB89 673, G173.57+2.43, S233-IR, S235 Central, S235 East2 и S235-AB. Признаков истечения не обнаружено в направлении на S235 East1 и G173.17+2.55. В разделе 3.7 приведены основные выводы.

В **Главе 4** рассмотрены статистические характеристики молекулярных облаков (соотношения Ларсона), полученные по результатам анализа моделей галактик с различной морфологией [A3*]. В разделе 4.1 представлены различные методы выделения структур. Рассмотрены два различных метода выделения облаков – анализ плоских изображений с помощью порога на лучевую концентрацию водорода и анализ «кубов данных» положение-положение-скорость с помощью метода выделения структур CLUMPFIND [4]. В разделе 4.2 представлены формулы для расчета основных физических параметров молекулярных облаков, в том числе приведен их статистический анализ.

Центральной темой главы 4 является рассмотрение структурных соотношений (соотношений Ларсона), которые отражают основные характеристики ГМО. В разделе 4.3 получены структурные соотношения для ГМО (разделы 4.3.1-4.3.3), в том числе рассмотрена зависимость показателей структурных соотношений от шага по скорости (раздел 4.3.4) и пороговых значений (раздел 4.3.5). Для моделей галактик рассчитан спектр масс ГМО (раздел 4.3.6).

В разделе 4.4 приведены основные выводы. Установлено, что физические параметры облаков в обоих методах в целом соответствуют друг другу. В случае вариации порога лучевой концентрации при анализе двухмерных изображений найдены существенные изменения коэффициентов соотношений Ларсона. С другой стороны, соотношения Ларсона остаются инвариантны к порогу яркостной температуры CO при анализе «кубов данных» положение-положение-скорость. Спектр масс молекулярных облаков при анализе кубов данных в некоторой степени зависит от морфологии галактик. В случае анализа плоских изображений найдена существенная зависимость спектра масс от морфологии галактик.

В **Заключении** суммируются основные результаты работы.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- A1. **Ladeyschikov D.A.**, Sobolev A.M., Parfenov S.Yu., Alexeeva S.A., Bieging J.H. *Star formation in the S233 region* // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2015. – Vol. 452, 3. – P. 2306-2317.
- A2. **Ladeyschikov D.A.**, Kirsanova M.S., Tsivilev A.P., Sobolev A.M. *Molecular Emission in Dense Massive Clumps from the Star-Forming Regions S231-S235* // Astrophys. Bull. – 2016. – Vol. 71, 2. – P. 208-224.
- A3. Khoperskov S.A., Vasiliev E.O., **Ladeyschikov D.A.**, Sobolev A.M., Khoperskov A.V. *GMCs scaling relations: role of the cloud definition* // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2016. – Vol. 455, 2. – P.1782-1795.

Другие публикации автора по теме диссертации

- B1. Хоперсков С.А., Соболев А.М, **Ладейщиков Д.А.**, Хоперсков А.В., Еремин М.А. *Гигантские молекулярные облака на периферии Галактики: наблюдения и гидродинамические модели* // Тезисы докладов на Всероссийской астрономической конференции «От эпохи Галилея до наших дней», Нижний Архыз, 12-19 сентября 2010 г. – Изд-во ООО «КАДО» г. Геленджик, 2010. – С. 136
- B2. Соболев А.М., Цивилев А.П., Смирнов Г.Т., Парфенов С.Ю., **Ладейщиков Д.А.**, Ниязгулов С.Ю., Bieging J.H., Voley P.A., Шелемей О.В., Моисеев А.В. *Обнаружение лазера H₂O в источнике IRAS*

05375+3536 на RT-22 ПРАО ФИАН // Тезисы докладов на Всероссийской астрономической конференции «От эпохи Галилея до наших дней», Нижний Архыз, 12-19 сентября 2010 г. – Изд-во ООО «КАДО» г. Геленджик, 2010. – С. 106.

- В3. **Ладейщиков Д.А.**, Ахматханова Г.Г., Соболев А.М. *Образуются ли звезды на границе туманности S233?* // Физика Космоса: Тр. 41-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 30 янв. – 3 февр. 2012 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. – С. 245.
- В4. **Ladeyschikov D.A.** *New double-channel radiometer for RT-22 radio telescope* // Abstract book of XLII Young European Radio Astronomers conference, published by PRAO ASC LPI, Pushchino, Russia, 2012, P. 12.
- В5. **Ладейщиков Д.А.**, Смирнов Г.Т., Цивилев А.П. *Разработка системы автоматизации для двухканального радиометра RT-22 диапазон 8 мм* // Физика Космоса: Тр. 42-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв. – 1 февр. 2013 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – С. 176.
- В6. Sobolev A.M., **Ladeyschikov D.A.**, Loktin A.V., Bieging J.H. *Construction and Origin of the Giant Star Forming Complex G173* // Star formation across space and time, ESA/ESTEC, 11-14 november 2014, Noordwijk, The Netherlands. http://herschel.esac.esa.int/SFaz2014/Posters/120_SobolevA.pdf
- В7. **Ладейщиков Д.А.**, Кирсанова М.С., Цивилев А.П., Соболев А.М. *Излучение молекул в направлении на массивные сгустки областей звездообразования S231-S235* // Физика Космоса: Тр. 45-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 1 – 5 февр. 2016 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – С. 220.
- В8. Хоперсков С.А., Васильев Е.О., **Ладейщиков Д.А.**, Соболев А.М., Хоперсков А.В. *Роль методов выделения облаков в анализе структурных соотношений гигантских молекулярных облаков* // Физика Космоса: Тр. 45-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 1 – 5 февр. 2016 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – С. 254.

Список библиографических ССЫЛОК

1. Clark P. C., Glover S. C. O. *On column density thresholds and the star formation rate* // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2014. — Vol. 444. — P. 2396–2414.
2. Benincasa S. M., Tasker E. J., Pudritz R. E., Wadsley J. *Giant Molecular Cloud Formation in Disk Galaxies: Characterizing Simulated versus Observed Cloud Catalogs* // Astrophys. J. — 2013. — Vol. 776. — P. 23.
3. Tasker E. J., Tan J. C. *Star Formation in Disk Galaxies. I. Formation and Evolution of Giant Molecular Clouds via Gravitational Instability and Cloud Collisions* // Astrophys. J. — 2009. — Vol. 700. — P. 358–375.
4. Williams J. P., de Geus E. J., Blitz L. *Determining structure in molecular clouds* // Astrophys. J. — 1994. — Vol. 428. — P. 693–712.
5. Stutzki J., Guesten R. *High spatial resolution isotopic CO and CS observations of M17 SW - The clumpy structure of the molecular cloud core* // Astrophys. J. — 1990. — Vol. 356. — P. 513–533.
6. Berry D. S., Reinhold K., Jenness T., Economou F. *CUPID: A Clump Identification and Analysis Package* // Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI / Ed. by R. A. Shaw, F. Hill, D. J. Bell: Astronomical Society of the Pacific Conference Series. — Vol. 376. — 2007. — P. 425.
7. Williams J. P., de Geus E. J., Blitz L. *Determining structure in molecular clouds* // Astrophys. J. — 1994. — Vol. 428. — P. 693–712.

8. Wouterloot J. G. A., Walmsley C. M., Henkel C. *Ammonia towards IRAS sources in the Orion and Cepheus clouds* // Astron. Astrophys. — 1988. — Vol. 203. — P. 367–377.
9. Schreyer K., Henning T., Koempe C., Harjunpää P. *NH₃ and HCO⁺ towards luminous IRAS sources.* // Astron. Astrophys. — 1996. — Vol. 306. — P. 267.
10. Kirsanova M. S., Wiebe D. S., Sobolev A. M. et al. *Physical conditions in star-forming regions around S235* // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2014. — Vol. 437. — P. 1593–1608.
11. Pirogov L. E., Johansson L. E. B., Zinchenko I. I. *HC₃N Observations of the Outer Galaxy Dense Cores* // Astron. Astrophys. Trans. — 2003. — Vol. 22. — P. 33–41.
12. Harju J., Lehtinen K., Booth R. S., Zinchenko I. *A survey of SiO emission towards interstellar masers. I. SiO line characteristics* // Astron. Astrophys., Suppl. Ser. — 1998. — Vol. 132. — P. 211–231.
13. Liechti S., Wilson T. L. *Maps of the 36GHz methanol emission.* // Astron. Astrophys. — 1996. — Vol. 314. — P. 615–624.
14. Larson R. B. *Turbulence and star formation in molecular clouds* // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1981. — Vol. 194. — P. 809–826.
15. Bolatto A. D., Leroy A. K., Rosolowsky E. et al. *The Resolved Properties of Extragalactic Giant Molecular Clouds* // Astrophys. J. — 2008. — Vol. 686. — P. 948–965.
16. Solomon P. M., Rivolo A. R., Barrett J., Yahil A. *Mass, luminosity, and line width relations of Galactic molecular clouds* // Astrophys. J. — 1987. — Vol. 319. — P. 730–741.
17. Roman-Duval J., Jackson J. M., Heyer M. et al. *Physical Properties and Galactic Distribution of Molecular Clouds Identified in the Galactic Ring Survey* // Astrophys. J. — 2010. — Vol. 723. — P. 492–507.
18. Connelley M. S., Reipurth B., Tokunaga A. T. *Infrared Nebulae around Young Stellar Objects* // Astron. J. — 2007. — Vol. 133. — P. 1528–1559.
19. Draine B. T., Dale D. A., Bendo G. et al. *Dust Masses, PAH Abundances, and Starlight Intensities in the SINGS Galaxy Sample* // Astrophys. J. — 2007. — Vol. 663. — P. 866–894.

20. Thompson M. A., Urquhart J. S., White G. J. *A Compact Array imaging survey of southern bright-rimmed clouds* // *Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 415. — P. 627–642.
21. Wright E. L., Eisenhardt P. R. M., Mainzer A. K. et al. *The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance* // *Astron. J.* — 2010. — Vol. 140. — P. 1868–1881.
22. Lawrence A., Warren S. J., Almaini O. et al. *The UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS)* // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2007. — Vol. 379. — P. 1599–1617.
23. Ginsburg A., Glenn J., Rosolowsky E. et al. *The Bolocam Galactic Plane Survey. IX. Data Release 2 and Outer Galaxy Extension* // *Astrophys. J., Suppl. Ser.* — 2013. — Vol. 208. — P. 14.
24. Kauffmann J., Pillai T., Goldsmith P. F. *Low Virial Parameters in Molecular Clouds: Implications for High-mass Star Formation and Magnetic Fields* // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 779. — P. 185.
25. McKee C. F., Zweibel E. G. *On the virial theorem for turbulent molecular clouds* // *Astrophys. J.* — 1992. — Vol. 399. — P. 551–562.