

На правах рукописи

УДК 524.5

Кирсанова Мария Сергеевна

ХИМИЯ И ДИНАМИКА ГАЗА ВБЛИЗИ МОЛОДЫХ
МАССИВНЫХ ЗВЕЗД

Специальность 01.03.02 — астрофизика и радиоастрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва — 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте астрономии РАН

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук Вибе Дмитрий Зигфридович

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук проф. Зинченко Игорь Иванович,
кандидат физ.-мат. наук Каленский Сергей Владимирович

Ведущая организация:

Федеральное государственное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Южный федеральный университет»

Защита состоится 09 ноября 2009 г. в 15 часов на заседании Диссертационного
совета Д002.023.01 Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу:
119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института
им. П. Н. Лебедева РАН (Москва, Ленинский проспект, д. 53)

Автореферат разослан 25 сентября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета:

д. ф.-м. н. Ю. А. Ковалев

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Массивные звезды определяют множество явлений, происходящих в нашей Галактике и других галактиках. Они передают межзвездной среде кинетическую и тепловую энергию, а также дополнительный момент импульса [1]. Передача энергии и момента импульса от звезд к межзвездной среде происходит при взрывах сверхновых, вместе со звездным ветром, при расширении зон ионизованного водорода (зон H II) и распространении молекулярных истечений вещества от молодых звезд [2]. Излучение как самих массивных звезд, так и окружающего их вещества позволяет изучать строение и эволюцию Галактики и далеких внегалактических объектов. Например, измерения тригонометрических параллаксов мазеров воды и метанола позволяют изучить кривую вращения Галактики [3] и ее спиральную структуру [4].

Образование массивных звезд само по себе представляет важнейшую астрофизическую задачу, которая в настоящий момент еще не решена. В работах по исследованию рождения звезд малых масс уже выделены эволюционные стадии, через которые проходят протозвездные объекты [5], но теория образования массивных звезд так глубоко не разработана. Имеется много доводов в пользу того, что процесс образования массивных звезд не является крупномасштабным аналогом процесса образования звезд малых масс [6]. Одним из характерных признаков областей образования массивных звезд является то, что примерно 15 процентов жизни на Главной Последовательности массивная звезда проводит в родительском облаке [7]. Эта фаза эволюции проходит в несколько этапов: зарождение массивной протозвезды в инфракрасном темном облаке (infrared dark clouds), активный нагрев родительского облака без ионизации газа на стадии горячего молекулярного ядра (hot molecular core), начало ионизации газа родительского облака, возможно, на стадиях гипер- и ультракомпактной зоны H II (hcH II, ucH II region) с дальнейшим развитием зоны ионизованного водорода, наблюдаемой как компактная и классическая зона H II [8, 9].

Классические зоны H II привлекли к себе особое внимание астрофизиков в последние 7–8 лет. Анализ изображений галактического диска, полученных на Космическом телескопе им. Спитцера (проект *Spitzer-GLIMPSE*) в ИК-диапазоне выявил около 600 т. н. «инфракрасных пузырей» (infrared bubbles [10, 11]), образованных звездами класса O и ранними B-звездами, — фотодиссоциационных областей (photodissociation region, ФДО) вокруг молодых звезд. ФДО отделяет зону H II от окружающего ее молекулярного облака. Таким образом, результаты, полученные на «Спитцере» открыли возможность изучать весь спектр процессов, происходящих вокруг зон H II.

Данные ИК-обсерваторий привели к всплеску работ по исследованию звездообразования, стимулированного или индуцированного (triggered) расширением зон H II, теоретическая база для которого уже была разработана ранее (см., например, [12]). В настоящее время в Галактике исследовано уже более десятка очагов образования звезд с зонами H II, морфология которых согласуется с предположением о многоэтапном стимулированном звездообразовании. Наиболее полное исследование зон H II, на границах которых наблюдаются очаги звездообразования, представлено в работах [13, 14]. Вокруг зон H II, образованных O-звездами, наблюдаются молекулярные сгустки, формирование которых было индуцировано расширением этих зон. Массы сгустков лежат в пределах от 5 до 1000 M_{\odot} , и по всей видимости звезды второго поколения будут иметь меньшую массу, чем звезда, ионизирующая туманность [14]. Индуцированное звездообразование наблюдается и в комплексах, состоящих из нескольких зон H II, например в областях Sh254-258, где ионизованные туманности образованы объектами спектральных классов O и B [15, 16]. В этом молекулярном комплексе обнаружено шесть новых звездных скоплений, погруженных в родительское облако. Звездообразование, индуцированное несколькими зонами H II, наблюдается и в комплексе W5 [17]. Вывод о том, что образование новых скоплений было стимулировано расширением зоны H II, и предположение о последовательности образования скоплений сделаны в этих работах на основании оценки возраста самой зоны H II и относительного количества объектов класса I и класса II в них. Недостающим звеном в описанных выше работах является практически полное отсутствие анализа

кинематики газа в областях индуцированного звездообразования, что может оказаться необходимым для изучения этого процесса в условиях неоднородной среды и сложной морфологии молекулярных комплексов.

Таким образом, с появлением ИК-обсерваторий вопрос о влиянии молодых массивных звезд на окружающее их вещество получил новое направление развития. Анализируя информацию, полученную в нескольких диапазонах длин волн — от оптического до радио, — можно проследить изменение диапазона физических условий, в котором происходит переход газа из молекулярного в атомарное, а затем и в ионизованное состояние. Это открывает новые возможности исследовать нерешенные вопросы физики образования массивных звезд. Развитие вычислительных мощностей, в свою очередь, позволяет создавать самосогласованные модели химико-динамической эволюции протозвездных объектов. Уже достигнуты значительные успехи в моделировании дозвездных ядер малых масс, значительная доля в которых принадлежит сотрудникам Института астрономии РАН (например, [18, 19]), а также группе под руководством Ю. Аикава [20]. Расчет переноса излучения и формирования профилей молекулярных линий по результатам такого моделирования позволил найти объяснение наблюдательным данным по конкретным протозвездным объектам [21, 22]. Результаты проведенной работы позволяют двигаться в направлении создания самосогласованных химико-динамических моделей областей образования массивных звезд с учетом их основного отличия — мощного УФ-излучения молодой массивной звезды и практически 100-процентной ионизации ближайших к звезде областей.

Цели и задачи диссертационной работы

Цель настоящей диссертационной работы — изучение проявлений воздействия зон II на окружающее молекулярное облако для проведения диагностики процессов в зоне звездообразования и ее эволюционного статуса на основе наблюдений. В областях образования массивных звезд происходит большое количество сложных процессов, и данная работа вносит вклад в решение фундаментальной астрофизической задачи — исследование взаи-

модействия молодых массивных звезд с их окружением: газо-пылевыми молекулярными облаками и другими молодыми звездами.

Проведение диагностики физических и химических процессов в областях звездообразования возможно при наличии результатов спектральных наблюдений линий излучения различных молекул, атомов и ионов. Поэтому в настоящей диссертационной работе решаются следующие задачи:

- Исследование процесса испарения молекул с поверхности пыли вблизи расширяющихся зон H II, а также их последующей диссоциации и ионизации.
- Исследование кинематики, физических условий и химического состава молекулярного облака, окружающего зону H II, на основе модельных расчетов и результатов наблюдений.

Методы исследования

Для проведения исследования в настоящей работе были проведены:

- Разработка самосогласованной химико-динамической модели эволюции зоны H II, окруженной молекулярным облаком.
- Численное исследование зависимости физических условий и химического состава газа вокруг зоны H II от его начальной плотности и спектрального класса звезды.
- Спектральные наблюдения излучения молекул-трассеров и определение на основе полученных данных физических условий и кинематики в плотном и разреженном газе вблизи зоны H II Sh2-235 для оценки ее эволюционного статуса и влияния на окружающий газ.

Научная новизна работы

- Построена самосогласованная химико-динамическая численная модель эволюции области НII в окружающем молекулярном облаке, в которой впервые газодинамические уравнения, описывающие эволюцию зоны НII, соединены с набором химических процессов, учитывающим как реакции в газовой фазе, так и обмен химическими компонентами между пылью и газом.
- Впервые высказана гипотеза о том, что образование молодых звездных скоплений вблизи зоны Н II Sh2-235 стимулировано ее расширением.
- Данные по кинематике молекулярного газа впервые использованы для определения областей в молекулярном облаке, связанных с различными этапами стимулированного звездообразования.
- Впервые построены карты распределения температуры газа и лучевой концентрации аммиака в направлении на молодые звездные скопления вокруг Sh2-235.
- На основании результатов наблюдений излучения молекул в радиолиниях CS (2–1), NH₃(1,1), NH₃(2,2), NH₃(3,3) и ¹³CO (1–0) впервые высказано предположение о том, что молодые звездные скопления вокруг Sh2-235 имеют разный эволюционный статус.

Научная и практическая ценность работы

Разработанная в диссертации самосогласованная химико-динамическая модель эволюции зоны НII в окружающем молекулярном облаке открывает широкие возможности для исследования областей образования массивных звезд. Результаты моделирования позволяют одновременно исследовать изменение физических условий в газо-пылевой среде вокруг молодой звезды и ее химического состава. Такие исследования необходимы для диагностики областей образования массивных звезд, конечная цель которой — дать ответ на

вопрос о том, как образуются массивные звезды и как они взаимодействуют с окружающим родительским молекулярным облаком и ближайшими молодыми звездами.

Методика анализа данных спектральных наблюдений излучения молекул вблизи областей Н II может стать эффективным средством исследования процесса стимулированного звездообразования в неоднородной среде с нетепловыми движениями.

Результаты настоящей диссертации могут быть использованы в Институте астрономии РАН и других организациях, где ведутся исследования процесса звездообразования и межзвездной среды, например, в Астрокосмическом центре ФИАН и Пуццинской радиоастрономической обсерватории, Институте прикладной физики РАН, САО РАН, Уральском государственном университете им. А. М. Горького, Волгоградском государственном университете, Южном Федеральном университете, институтах Общества им. Макса Планка (Германия), Обсерватории Лейденского университета и других российских и зарубежных организациях.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Самосогласованная химико-динамическая модель эволюции зон Н II в окружающем молекулярном облаке в одномерном приближении. В модели учтены важнейшие процессы, определяющие химическую структуру газа вблизи молодых массивных звезд. Отличительной чертой модели является включение взаимодействия молекул в газовой фазе с поверхностями межзвездных пылинок.
2. Зависимость ширины переходных областей между фронтами диссоциации и испарения для молекул CO, OH, H₂O и H₂CO от объемной концентрации газа и эффективной температуры звезды вблизи расширяющейся зоны Н II.
3. Спектральные карты излучения в линиях, соответствующих переходам $J = 1 \rightarrow 0$ молекулы ¹³CO, $J = 2 \rightarrow 1$ молекулы CS и переходам

$(J, K) = (1, 1), (2, 2)$ молекулы NH_3 . Карты распределения физических параметров газа в молекулярном комплексе S235.

4. Последовательность этапов процесса звездообразования в молекулярном комплексе, окружающем зону H II Sh2-235. Три молодых звездных скопления образовались на краях зоны H II, по-видимому, вследствие ее расширения. Скопление S235 East 1, вероятно, находится на более ранней эволюционной стадии, чем S235 East 2 и S235 Central, и полностью погружено в холодный и плотный газ.
5. Анализ использования кинематики газа вблизи зон H II для установления последовательности процессов звездообразования в молекулярных комплексах с неоднородной средой и нетепловыми движениями.

Все выводы, представленные в диссертации, получены впервые на основе собственных результатов численного моделирования и спектральных наблюдений автора.

Апробация результатов

Результаты работы были представлены на следующих семинарах и конференциях:

- Астрофизический семинар Института астрономии РАН (2008 г.) и Волгоградского государственного университета (2009 г.)
- Семинар Волгоградского государственного университета «Структурные и химические трансформации межзвездного газа, обусловленные галактической ударной волной» (2008 г.)
- Российско-французский семинар «Physical conditions associated with the earliest stages of massive star formation: towards an understanding of the role played by Galactic HII regions» (2008 г., Марсель, Франция)

- Российско-китайский семинар «Millimeter wave astronomy and star formation» (2007 г., Нижний Новгород)
- Симпозиум Международного астрономического союза № 237 «Triggered Star Formation in Turbulent Interstellar Medium» (2006 г., Прага, Чешская Республика)
- Симпозиум Международного астрономического союза № 242 «Astrophysical masers and their environment» (2007 г., Элис Спрингс, Австралия)
- Международный симпозиум COSPAR (2008 г., Монреаль, Канада)
- Международная конференция «Massive Star Formation: Observations confront Theory» (2007 г., Гейдельберг, Германия)
- Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2007 (2007 г., Казань)
- Конференция «Звездообразование в Галактике и за ее пределами» (2006 г., Москва)
- XXXV, XXXVI и XXXVIII зимние студенческие конференции «Физика Космоса» (2006, 2007, 2009 г., Екатеринбург, Астрономическая обсерватория УрГУ)
- Конференции молодых ученых Института астрономии РАН (2007, 2008 г.)

Личный вклад автора в совместные работы

Все статьи в рецензируемых научных журналах, лежащие в основе настоящей работы, написаны в соавторстве. Автор диссертации лично провел следующие работы:

- Разработка алгоритма и программного кода самосогласованной химико-динамической модели зоны II, окруженной молекулярным облаком.

- Проведение всех модельных расчетов и анализ полученных результатов.
- Подготовка заявок для участия в конкурсе по распределению наблюдательного времени на радиотелескопах и проведение наблюдений с помощью этих инструментов.
- Полная обработка данных наблюдений, построение спектров и карт излучения объектов.
- Проведение работы с архивами данных наблюдений оптических и инфракрасных телескопов.
- Активное участие в постановке задач для модельных расчетов и наблюдений, в анализе и обсуждении результатов.
- Написание основной части текста совместных статей и подготовка иллюстраций.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 17 работах.

1. *Курсанова М. С., Вибе Д. З., Соболев А. М.* Химико-динамическая эволюция газа вблизи расширяющейся зоны Н II // *Астрон. журн*— 2009. — Том 86. — С. 661-683.
2. *Kirsanova M. S., Sobolev A. M., Thomasson M., Wiebe D. S., Johansson L. E. B., Seleznev A. F.* Star formation around the HII region Sh2-235 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2008.— Vol. 388.— P. 729-736.
3. *Вибе Д. З., Курсанова М. С., Шустов Б. М., Павлюченков Я. Н.* Проблемы теории звездообразования и перспективы наблюдений в субмиллиметровом диапазоне // *Астрон. журн*— 2008. — Том 85. — С. 1086-1095.

4. *Kirsanova M. S., Sobolev A., Thomasson M., Henkel C., Seleznev A., Johansson L. E. B.* Study of triggered star formation around HII region S235 // Millimeter wave astronomy and star formation.— Proceedings of Russian-Chinese workshop, Nizhny Novgorod, 27-28 August.— Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics RAS, 2007.— P. 23-29.
5. *Sobolev A., Kirsanova M., Pankratova N., Ostrovskii A., Shelemei O., Thomasson M., Johansson L. E. B., Vasyunina T., Tsvilev A.* Methanol masers in star forming sites of the Perseus spiral arm // Millimeter wave astronomy and star formation.— Proceedings of Russian-Chinese workshop, Nizhny Novgorod, 27-28 August.— Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics RAS, 2007.— P. 61-67.
6. *Кирсанова М. С., Соболев А. М. Томассон М., Хенкель К., Селезнев А. Ф., Юханссон Л. Е. Б., Цивилев А. П.* Индуцированное звездообразование в окрестности S235 // Труды всероссийской астрономической конференции ВАК-2007. — Сборник трудов конференции, Казань, 17-22 сентября. — Казань: Изд-во Казанского государственного ун-та, 2007. — С. 320-321.
7. *Кирсанова М. С., Соболев А. М., Томассон М., Юханссон Л. Е. Б., Шелемей О. В., Цивилев А. П., Поляков А. М., Панкратова Н. В.* Обзор областей образования массивных звезд из спирального рукава Персея в молекулярных радиолиниях // Звездообразование в Галактике и за ее пределами.— Сборник трудов конференции, Москва, 17-18 апреля.— Москва: Янус-К, 2006.— С. 42-50.
8. *Kirsanova M., Wiebe D., Sobolev A. M.* Coupled chemistry and dynamics of a region affected by ionization-shock front in the vicinity of a young massive stellar object // 37th COSPAR Scientific Assembly — Vol. 37 of COSPAR, Plenary Meeting. — 2008. — P. 1527.
9. *Sobolev, A. M., Cragg, D. M., Ellingsen, S. P., Gaylard, M. J., Goedhart, S., and Henkel, C., Kirsanova, M. S., Ostrovskii, A. B., Pankratova, N. V., Shelemei, O. V., van der Walt, D. J., Vasyunina, T. S., Voronkov,*

- M. A.* How do methanol masers manage to appear in the youngest star vicinities and isolated molecular clumps? // IAU Symposium / Ed. by J. M. Chapman, W. A. Baan — Vol. 242 of IAU Symposium — 2007 — P. 81-88.
10. *Курсанова М. С., Вибе Д. З., Соболев А. М.* Химико-динамическая эволюция газа вблизи расширяющейся зоны HII // Физика космоса. — Тр. 38-й международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 2 -6 февр. 2009 г. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2009. — С. 327.
 11. *Курсанова М. С., Павлюченков Я. Н.* Образование спектральных линий излучения атомов и молекул вокруг молодой массивной звезды // Физика космоса. — Тр. 38-й международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 2 — 6 февр. 2009 г. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2009. — С. 344.
 12. *Старенькая Е. А., Курсанова М. С., Соболев А. М., Островский А. Б.* Определение параметров возбуждения нижних вращательных переходов молекулы аммиака в межзвездных молекулярных облаках // Физика космоса. — Тр. 37-й международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 28 янв. — 1 февр. 2008 г. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. — С. 291.
 13. *Курсанова М. С., Соболев А. М., Юханссон Л. Е., Томассон М., Цивилев А. П.* Исследование звездообразования в области G173.69+2.87 // Физика космоса. — Тр. 36-й международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 29 янв. — 2 февр. 2007 г. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2007. — С. 234.
 14. *Панкратова Н. В., Соболев А. М., Курсанова М. С., Васюнина Т. С., Крушинский В. В.* Инфракарсные и оптические свойства областей образования массивных звезд в рукаве Персея // Физика космоса. — Тр. 36-й международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 29 янв. — 2 февр. 2007 г. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2007. — С. 213.

15. *Курсанова М. С., Соболев А. М., Юханссон Л. Е. Б., Томассон М.* Исследование областей массивного звездообразования в спиральном рукаве Персея // Физика космоса. — Тр. 35-й международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 30 янв. — 3 февр. 2006 г. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2006. — С. 224.
16. *Шелемей О. В., Курсанова М. С., Поляков А. М., Панкратова Н. В., Соболев А. М., Цивилев А. П.* Наблюдения линии NH₃ в областях массивного звездообразования рукава Персея на 22-метровом телескопе ПРАО ФИАН // Физика космоса. — Тр. 35-й международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 30 янв. — 3 февр. 2006 г. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2006. — С. 239.
17. *Курсанова М. С., Поляков А. М., Струнина Т. В., Панкратова Н. В., Соболев А. М., Цивилев А. П.* Наблюдения спектральных линий аммиака в областях образования массивных звезд // Физика космоса. — Тр. 34-й международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 31 янв. — 4 февр. 2005 г. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2005. — С. 224.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из Введения, четырех глав, Заключение и Приложения. Объем работы составляет 163 страницы, включая 32 рисунка (в том числе 3 рисунка в приложении) и 10 таблиц. Список цитируемой литературы состоит из 189 наименований.

Краткое содержание работы

Введение в диссертационную работу содержит обоснование актуальности выбранной темы исследований на основе анализа имеющихся литературных источников. Также представлены цели диссертации, задачи, решаемые в ней, используемые методы исследования, научная новизна работы, ее научная и практическая ценность.

Глава 1 открывает первую часть диссертационной работы, в которой эволюция газа вблизи молодых массивных звезд исследована численно. Глава начинается с краткого обзора существующих на сегодняшний день данных астрофизических наблюдений о зонах ионизованного водорода и окружающего их атомарного и молекулярного вещества. Сформулированы предпосылки для создания самосогласованной химико-динамической модели зоны H II в окружающем молекулярном облаке. Далее в Главе 1 описывается разработка самосогласованной химико-динамической модели эволюции зоны H II и окружающего газа в одномерном приближении. В модели учтены важнейшие процессы, определяющие химическую структуру газа вблизи молодых массивных звезд: нагрев газа вследствие фотопроцессов и химических реакций, охлаждение газа за счет излучения атомов и молекул в линиях, столкновительное взаимодействие с пылью и др. Отличительной чертой модели является включение взаимодействия молекул в газовой фазе с поверхностями межзвездных пылинок — аккреция молекул на пыль и десорбция с нее. В Главе 1 подробно описаны все физические и химические процессы, включенные в модель. Также в этой Главе приведены результаты тестовых расчетов стационарных моделей.

Глава 2 посвящена моделированию расширения зон H II в окружающем молекулярном газе. Рассмотрено пять вариантов начальных условий, отличающихся между собой начальной плотностью газа и спектром звезды. Исследована зависимость распространения фронтов ионизации и диссоциации химических соединений от параметров модели, а также зависимость ширины переходных областей между фронтами диссоциации и испарения для молекул CO, OH, H₂O и H₂CO. Кроме того, рассмотрено изменение физических

свойств газа и пыли по мере расширения зон Н II. В Главе 2 показано, что конкуренция между процессами испарения мантий пылевых частиц и фотодиссоциации молекул в газовой фазе приводит к формированию переходного слоя между зоной Н II и молекулярной средой, для которого характерно высокое содержание молекул в газовой фазе. Ширина переходного слоя различна для молекул CO, OH, H₂O и H₂CO. При начальной плотности газа 10³ см⁻³ рост содержания молекул H₂O и H₂CO в переходном слое после десорбции с пыли происходит не скачком, а постепенно, поэтому понятие «фронта испарения» для молекулярного облака невысокой плотности можно использовать лишь формально. Кроме того, существенно расстояние между фронтами испарения различных молекул, оно может достигать 1 пк. При более высокой начальной плотности газа (10⁴ см⁻³) происходит образование резких фронтов испарения молекул, причем фронты находятся близко друг к другу и к ударному фронту. В этом случае можно говорить о едином фронте испарения для молекул CO, H₂O и H₂CO. Увеличение эффективной температуры звезды также приводит к сокращению ширины переходного слоя.

Глава 3 начинается вторую часть диссертационной работы, посвященную наблюдениям области образования массивной звезды. В этой главе описаны наблюдаемые проявления зон Н II и описан комплекс звездообразования вокруг зоны Н II Sh2-235 по данным из литературных источников. Далее представлено описание работ по наблюдениям радиолиний молекул CO, CS на 20-метровом телескопе Онсальской обсерватории (Швеция) и линий аммиака на 100-метровом телескопе в Эффельсберге (Германия) в направлении комплекса звездообразования S235, проведенных автором диссертации. Описана процедура подсчетов ИК-источников по данным каталога 2MASS в широкой окрестности Sh2-235.

В Главе 4 представлены результаты наблюдений: полученные спектры, карты молекулярного излучения ¹³CO (1-0), CS (2-1), а также линий NH₃(1,1) и NH₃(2,2) в направлении на комплекс звездообразования S235 и карты распределения физических параметров молекулярного газа в нем. Обнаружено, что зона Н II окружена молекулярной оболочкой, содержащей плотные сгустки с погруженными в них молодыми звездными скоплениями. Рассмотрены

данные, указывающие на последовательность звездообразования в комплексе. Три молодых звездных скопления образовались на краях зоны Н II, по видимому, вследствие ее расширения. Рассмотрены две модели стимулированного звездообразования, которые, возможно, подходят для S235: «сбор и сжатие» и сжатие уже существующих сгустков вследствие расширения зоны Н II. На основе данных собственных наблюдений автора диссертационной работы и литературных источников представлены аргументы в пользу того, что скопление S235 East 1 находится на более ранней стадии эволюции, чем скопления S235 East 2 и S235 Central, и полностью погружено в холодный и плотный газ. Показано преимущество использования кинематики газа вблизи зон Н II для установления последовательности процессов звездообразования в молекулярных комплексах с неоднородной средой и нетепловыми движениями.

В Заключение диссертационной работы представлен список результатов, выносимых на защиту, который сопровождается сведениями об их апробации на научных семинарах и конференциях всероссийского и международного уровней. Список научных трудов по теме диссертации, представленный в этом разделе, содержит в себе как статьи в рецензируемых журналах, так и материалы различных конференций. Поскольку основные научные труды по теме диссертации написаны в соавторстве, здесь также представлены сведения о личном вкладе автора в совместные работы.

В Приложении описаны основы спектроскопии аммиака и метод определения физических условий в межзвездном газе по данным наблюдений спектральных радиолний этой молекулы. Данные о кинетической температуре газа, его плотности, а также лучевой концентрации молекул аммиака в нем, полученные с помощью этого метода, дали возможность подтвердить выводы о процессе звездообразования в комплексе S235, сделанные на основе изучения морфологии и кинематики межзвездного газа.

Список литературы

- [1] *Osterbrock D. E., Ferland G. J.* Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei, Ed. by D. E. Osterbrock, G. J. Ferland. — 2006.
- [2] *Каплан С. А., Пикельнер С. Б.* Межзвездная среда. — Москва: Физматлит, 1963.
- [3] *Honma M., Bushimata T., Choi Y. K. et al.* Astrometry of Galactic star-forming regions with VERA // IAU Symposium / Ed. by W. J. Jin, I. Platais, M. A. C. Perryman. — Vol. 248 of IAU Symposium. — 2008. — P. 198–199.
- [4] *Reid M. J., Menten K. M., Zheng X. W. et al.* Trigonometric Parallaxes of Massive Star-Forming Regions. VI. Galactic Structure, Fundamental Parameters, and Noncircular Motions // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 700. — P. 137–148.
- [5] *Andre P., Ward-Thompson D., Barsony M.* From Prestellar Cores to Protostars: the Initial Conditions of Star Formation // *Protostars and Planets IV.* — 2000. — P. 59–96.
- [6] *Zennicker H., Yourke H. W.* Toward understanding massive star formation // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 45. — P. 481–563.
- [7] *Churchwell E.* Ultra-Compact HII Regions and Massive Star Formation // *Annu. Rev. Astro. Astrophys.* — 2002. — Vol. 40. — P. 27–62.
- [8] *Menten K. M., Pillai T., Wyrowski F.* Initial conditions for massive star birth-Infrared dark clouds // *Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics* / Ed. by R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, M. Walmsley. — Vol. 227 of IAU Symposium. — 2005. — P. 23–34.
- [9] *van der Tak F. F. S., Menten K. M.* Very compact radio emission from high-mass protostars. II. Dust disks and ionized accretion flows // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 437. — P. 947–956.

- [10] *Churchwell E., Povich M. S., Allen D. et al.* The Bubbling Galactic Disk // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 649. — P. 759–778.
- [11] *Churchwell E., Watson D. F., Povich M. S. et al.* The Bubbling Galactic Disk. II. The Inner 20 deg // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 670. — P. 428–441.
- [12] *Elmegreen B. G., Lada C. J.* Sequential formation of subgroups in OB associations // *Astroph. J.* — 1977. — Vol. 214. — P. 725–741.
- [13] *Deharveng L., Lefloch B., Zavagno A. et al.* Triggered massive star formation at the border of the HII region Sh 140 // *Astron. Astroph.* — 2003. — Vol. 408. — P. 25–28.
- [14] *Deharveng L., Zavagno A.* Massive star formation triggered by galactic HII regions // *Massive star formation: observations confront theory* / Ed. by H. Beuther, H. Linz, H. T. — Vol. 387 of ASP Conference Series, Proc. conf., Heidelberg, Germany, 10-14 September 2007. — 2008. — P. 338–345.
- [15] *Chavarría L. A., Allen L. E., Hora J. L. et al.* Spitzer Observations of the Massive Star-forming Complex S254-S258: Structure and Evolution // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 682. — P. 445–462.
- [16] *Bieging J. H., Peters W. L., Vilaro B. V. et al.* Sequential star formation in the Sh 254-258 molecular cloud: HHT maps of CO J=3-2 and 2-1 emission // *IAU Symposium* / Ed. by B. G. Elmegreen, J. Palous. — Vol. 237 of IAU Symposium. — 2007. — P. 396–396.
- [17] *Koenig X. P., Allen L. E., Gutermuth R. A. et al.* Clustered and Triggered Star Formation in W5: Observations with Spitzer // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 688. — P. 1142–1158.
- [18] *Li Z.-Y., Shematovich V. I., Wiebe D. S., Shustov B. M.* A Coupled Dynamical and Chemical Model of Starless Cores of Magnetized Molecular Clouds. I. Formulation and Initial Results // *Astrophys. J.* — 2002. — Vol. 569. — P. 792–802.

- [19] *Shematovich V. I., Wiebe D. S., Shustov B. M., Li Z.-Y.* A Coupled Dynamical and Chemical Model of Starless Cores of Magnetized Molecular Clouds. II. Chemical Differentiation // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 588. — P. 894–909.
- [20] *Aikawa Y., Ohashi N., Herbst E.* Molecular Evolution in Collapsing Prestellar Cores. II. The Effect of Grain-Surface Reactions // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 593. — P. 906–924.
- [21] *Pavlyuchenkov Y., Wiebe D., Launhardt R., Henning T.* CB 17: Inferring the Dynamical History of a Prestellar Core with Chemodynamical Models // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 645. — P. 1212–1226.
- [22] *Pavlyuchenkov Y., Wiebe D., Shustov B. et al.* Molecular Emission Line Formation in Prestellar Cores // *Astrophys. J.* — 2008. — Vol. 689. — P. 335–350.