

На правах рукописи

Кочина Ольга Валерьевна

**Диагностика физических условий в областях
звздообразования при помощи химического
моделирования**

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

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

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

Официальные оппоненты: **Рудницкий Георгий Михайлович**,
д.ф.-м.н., заведующий отделом
радиоастрономии Государственного
астрономического института
имени П.К.Штернберга, Московский
государственный университет
имени М.В.Ломоносова, г. Москва

Балашев Сергей Александрович,
к.ф.-м.н., научный сотрудник,
сектор теоретической астрофизики,
Физико-технический институт
имени А.Ф.Иоффе, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Институт прикладной физики
Российской Академии наук,
г. Нижний Новгород

Защита состоится 7 июня 2017 года в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.280.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института астрономии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая 48.

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

Автореферат разослан _____ 2017 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Чупина Н. В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Звездообразование — важный и активно исследуемый процесс. Звезды рождаются в плотных молекулярных облаках, в которых вследствие возникновения гравитационной неустойчивости начинается активный процесс коллапса, приводящий к образованию плотного ядра, где впоследствии может развиваться будущая звезда. Однако исследователи ранних стадий звездообразования сталкиваются с рядом трудностей, основная из которых состоит в невозможности непосредственно наблюдать процессы, происходящие в облаке. Это связано с тем, что основным компонентом областей звездообразования является молекулярный водород, который в условиях плотных и холодных молекулярных облаков не излучает. Таким образом, основная масса вещества оказывается невидимой. Если вещество невозможно увидеть непосредственно, возникает вопрос, что можно использовать в качестве индикатора его наличия?

Первым самым очевидным кандидатом на роль индикатора является пыль, присутствующая в облаке в достаточном количестве и излучающая в континууме, тем более, что пыль и газ в облаках хорошо перемешаны. Однако по излучению пыли невозможно определить температуру газа. Также недоступна информация о движении вещества, а значит и о происходящих в нем процессах коллапса и аккреции. Кроме того, оценка физических условий по излучению пыли требует ряда предположений об оптических свойствах пылинок и их химическом составе, определение которых само по себе является отдельной задачей. Таким образом пыль оказывается недостаточно хорошим источником информации, и приходится искать другие индикаторы.

Такой успешной альтернативой пыли оказались молекулы. Молекулы излучают в линиях, а значит позволяют получить информацию о движении вещества, основываясь на их доплеровском сдвиге. Также излучение в линиях несет информацию о температуре газа. Примером индикатора температуры является аммиак. Из-за того что переходы между вращательными уровнями с одинаковыми значениями квантовых чисел являются метастабильными, время жизни на них превышает время между столкновениями. Поэтому состояние возбуждения отдельной молекулы аммиака определяется в основном столкновениями, а температура возбуждения молекул несет информацию о кинетической температуре газа. Однако в отличие от пыли молекулы не перемешаны с газом равномерно, у каждой из них имеется свое распределение, определяемое хи-

мическими процессами. Астрохимия, или космохимия, занимается тем, что объясняет подобные особенности и этим делает молекулы более удобными кандидатами на роль инструмента для диагностики состояния облака.

Одним из основных современных методов исследования химического состава межзвездной и околозвездной среды являются спектральные обзоры, то есть, получение спектра высокого разрешения для заданного направления в относительно широком диапазоне частот. Спектральный обзор позволяет наблюдать одновременно большое количество линий, принадлежащих десяткам молекул, включая как простые, так и сложные соединения. Спектральные обзоры являются не только источником информации о молекулярном составе исследуемого объекта, но и удобным инструментом для тестирования химических моделей. Полученные из спектральных обзоров интенсивности линий пересчитываются в содержания компонентов, которые можно сравнить с результатами астрохимического расчета. При этом развитие техники приводит к повышению чувствительности наблюдательных инструментов. Появляется возможность наблюдения линий, ранее считавшихся слишком слабыми. Идентифицируются новые молекулы; появляется интерес к сложным и нестандартным молекулам. Все это стимулирует развитие астрохимического подхода.

К сожалению, обратной стороной высокого спектрального разрешения оказывается, как правило, низкое угловое разрешение и (или) возможность изучения единственной позиции в направлении на исследуемый объект. Это вынуждает при анализе спектральных обзоров с особой тщательностью подходить к подбору физических условий, наилучшим образом описывающих исследуемый объект.

В настоящее время для моделирования областей звездообразования используются данные, полученные как с наземных, так и с космических телескопов, таких как ALMA (Атакамская Большая Миллиметровая/Субмиллиметровая Решётка) или космических телескопов Гершель и Спитцер. И хотя Гершель уже завершил свою работу, полученных им данных, в совокупности с данными Спитцера, накоплено достаточно, чтобы еще на многие годы обеспечивать исследователей материалом для обработки и моделирования. В частности, использование этих данных позволяет восстанавливать распределение плотности и поля излучения в изучаемых объектах. В целом, к построению модели объекта приходится подходить с двух сторон, при помощи модели химической эволюции подбирая такие физические условия, чтобы смоделированные содержания компонентов максимально соответствовали полученным из

наблюдений.

Для моделирования химической эволюции необходимы физическая модель, база данных с коэффициентами скоростей астрохимических реакций, математическое представление сетки химических реакций в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) и программа для решения системы ОДУ.

Физические модели, используемые для химического моделирования, имеют различную степень сложности. Развитие вычислительной техники стимулирует разработку максимально реалистичных моделей, в которых химические процессы моделируются одновременно и согласованно с трехмерной газодинамикой и переносом излучения. Однако практика исследования протозвездных объектов свидетельствует, что усложнение физической постановки задачи не всегда приводит к лучшему описанию результатов наблюдений. В общем случае, степень сложности физической модели выбирается в соответствии с целями и задачами конкретного исследования.

Первоначально в связи с ограниченными техническими возможностями для моделирования процессов химической эволюции использовались одноточечные модели [1, 2], предполагающие усреднение физических условий в различных областях облака, но, тем не менее, успешно воспроизводившие наблюдаемый химический состав. Успешной здесь и далее мы будем считать модель, в которой предсказанные содержания (относительные содержания, объемные концентрации, лучевые концентрации) большинства компонентов отличаются от наблюдаемых значений не более чем на порядок. Это условие может показаться нестрогим, однако, принимая во внимание сложности наблюдений, неопределенности перевода интенсивностей наблюдаемых линий в лучевые концентрации, а также значительный диапазон содержаний различных компонентов, это условие представляется оправданным [3, 4]. Примером подобных исследований является работа [2], в которой путем числового моделирования был воспроизведен полученный из наблюдений химический состав области звездообразования ТМС-1, а также оценен химический возраст региона. В дальнейшем получили развитие многоточечные одномерные модели [5–7], также успешно воспроизводившие наблюдаемые содержания.

Усложнение модели проявляется не только в учете различных физических условий в различных областях облака, а также в учете эволюции этих условий. Самыми простыми моделями с этой точки зрения можно считать псевдо-эволюционные [5, 8, 9], в которых эволюционирует только химический состав, а физические условия, например, поле излучения,

плотность и температура, остаются неизменными. В эволюционных же моделях физические параметры меняются со временем. Самым очевидным усложнением с целью приближения к реальным процессам, происходящим в звездообразующем облаке, является учет коллапса [10–14], то есть изменение распределения плотности и прогрев облака протозвездой [13, 15, 16]. Существуют и более сложные модели, учитывающие динамику [12, 17, 18].

В последнее время благодаря существенному развитию вычислительной техники появляется все больше работ, посвященных двух- и трехмерному моделированию областей звездообразования и отдельных протозвездных объектов с учетом химических реакций [17, 19–22]. Эти модели весьма сложны в разработке и требуют очень существенных вычислительных ресурсов, поэтому с их помощью удается пока моделировать эволюцию лишь простых молекул. Однако, с другой стороны, одновременно возрастает и интерес к наблюдениям и моделированию более сложных органических молекул. Модели, в которых учитывалось бы большое количество химических компонентов и реакций между ними, пока решаются в весьма упрощенной физической постановке, либо одномерной, либо даже одноточечной [16, 23, 24]. При этом подобные модели оказываются довольно успешными с точки зрения объяснения лучевых концентраций многих молекул, в том числе, и довольно сложных, в различных по физическим параметрам областях звездообразования. В качестве примера успешной одноточечной модели можно привести модель, представленную в работе Васюниной и др. [16]. В этой работе одноточечная химическая модель позволила успешно воспроизвести содержания ряда сложных соединений, полученных авторами в результате наблюдений инфракрасного темного облака IRDC028.34+0.06. Модификации одноточечной модели, используемые в работе Васюниной и др., включали как псевдо-эволюционную, с неизменными состояниями физических параметров, так и эволюционную, в которой учитывалось изменение температуры за счет прогрева облака излучением звезды, следом за холодной стадией, в которой температура оставалась неизменной.

В данной диссертационной работе соискателем был поставлен ряд целей, достижение которых позволит развить различные аспекты астрохимического моделирования.

Цели диссертационной работы

1. Разработка и тестирование методики, позволяющей моделировать химическую эволюцию сложных молекул в процессе образования звезд в различных условиях и для различных объектов.
2. Выявление сложных молекул, чувствительных к коллапсу и прогреву в процессе эволюции протозвездного объекта.
3. Исследование влияния размера пылинок на химическую эволюцию протозвездного объекта.
4. Выявление молекул, обладающих высоким диагностическим потенциалом для определения элементного состава протозвездного объекта.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработана методика анализа эволюции сложных органических соединений в протозвездных объектах. С ее помощью воспроизведены наблюдения десятков молекул в типичных областях образования маломассивных (TMC-1) и массивных (DR21(OH)) звезд. Оценены химические возрасты исследуемых объектов. Показано, что содержание сложных молекул в TMC-1 не требует предположения о нетипичном содержании углерода.
2. Показано, что предполагаемый возраст объекта определяется не столько простыми, сколько сложными молекулами. По простым молекулам, подобным CO и HCO^+ , возраст определить практически невозможно, поскольку их лучевые концентрации со временем почти не меняются.
3. Исследована возможность диагностики длительности различных этапов протозвездной эволюции (коллапса, начального прогрева протозвездой) по наблюдениям сложных органических молекул. Показано, что этап коллапса влияет лишь на самую раннюю эволюцию органических молекул. Различия в лучевых концентрациях между моделями с разной продолжительностью коллапса в период от 100 до 500 тыс. лет для большинства компонентов не превышают предела точности. Наибольшей чувствительностью к наличию фазы прогрева обладает излучение метанола.

4. Исследована роль пылинок, различающихся размерами, массовой долей и температурой, в химической эволюции протозвездных объектов. Показано, что введение мелких пылинок (с сохранением полной плотности пыли в среде) оказывается некритичным примерно для трети компонентов.
5. Показано, что в областях, граничащих с источниками УФ-излучения, наибольший вклад в различие содержаний вносит эффективное экранирование излучения мелкими пылинками.
6. Продемонстрирована возможность диагностики элементного состава протозвездных объектов по наблюдениям сложных органических и/или дейтерированных молекул. Показано, что наибольшей чувствительностью к элементному составу обладает ион DCO^+ .

Научная новизна

1. Впервые построена 1D-модель, объясняющая содержание большинства сложных молекул в областях образования звезд малой и большой массы.
2. Впервые проанализирован диагностический потенциал наблюдений сложных молекул при оценке физических параметров протозвездных объектов.
3. Впервые эволюция сложных молекул исследована в одномерной модели с различными населенностями пыли. Выявлены основные факторы влияния пылинок различных размеров на химическую эволюцию протозвездных объектов.
4. Впервые исследована возможность диагностики элементного состава протозвездных объектов по наблюдениям дейтерированных молекул.

Научная и практическая значимость

В настоящее время астрохимическое моделирование является стандартным подходом к интерпретации спектральных наблюдений как отдельных протозвездных объектов, так и целых областей звездообразования. Однако получение надежных выводов усложняется неопределенностью как внешних, так и внутренних параметров химической модели.

Важным критерием адекватности модели и правильности подбора параметров можно считать ее способность одновременно описывать эволюцию как простых двух-трехатомных молекул, так и существенно более сложных соединений. Модель, представленная в исследовании, успешно справляется с поставленной задачей и может эффективно использоваться для диагностики областей звездообразования.

Также важное значение проведенных исследований обеспечивает тем, что в результате проведенной работы из множества молекул, линии которых доступны наблюдениям, выявлены соединения, обладающие максимальным диагностическим потенциалом, наиболее чувствительные к изменениям физических условий, либо, напротив, такие, эволюция которых в наименьшей степени зависит от изменений физических условий. В работе даны рекомендации наблюдателям, на каких именно линиях стоит сосредоточить внимание.

Апробация работы

По результатам исследований опубликовано 8 работ, 5 из них – в рецензируемых изданиях. Результаты, представленные в диссертации, были доложены на 14 научных конференциях:

- Всероссийская конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии” Пуццино, Россия, 19 - 22 апреля 2016.
- 45-я студенческая научная конференция “Физика Космоса” Коуровка, Россия, 01 - 05 февраля 2016.
- Конкурс молодых ученых ИНАСАН, 2015.
- Заседание рабочей группы по теме “Межзвездная среда в галактиках” в рамках конференции “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пуццино, Россия, 23 - 24 апреля 2015.
- 44-я студенческая научная конференция “Физика Космоса” Коуровка, Россия, 02 - 06 февраля 2015.
- Конференция-семинар “Физика – космосу”, Байконур, Россия, 25 - 30 октября 2014.
- Всероссийская астрономическая конференция “Многоликая Вселенная” (ВАК-2013), Санкт-Петербург, Россия, 23-27 сентября 2013.
- Международный семинар “13th European Workshop on Astrobiology” (EANA’13), Щецин, Польша, 22 - 25 июля 2013.

- Международная конференция “European Week of Astronomy and Space Science” (EWASS 2012), Рим, Италия, 1 - 6 июля 2012.
- Международная конференция “Astronomy in the era of information explosion: results and problems”, Москва, Россия, 28 мая - 1 июня 2012
- Международная конференция “The Warm Universe: Astrochemistry at Intermediate and Elevated Temperature”, Таллин, Эстония, 29 мая - 2 июня 2012
- 41-я студенческая научная конференция “Физика космоса”, Коуровка, Россия, 30 января - 03 февраля 2012.
- Международная конференция “European Week of Astronomy and Space Science” (EWASS 2011), Санкт-Петербург, Россия, 4 - 8 июля 2011.
- Международный симпозиум IAU “IAUS 270: Computational star formation” Барселона, Испания, 31 мая - 4 июня 2010.

Личный вклад соискателя Соискатель в равной степени с другими соавторами участвовал в постановке задач, разработке методов, их тестировании, проведении расчетов, получении и представлении результатов и выводов.

В частности, соискателем:

1. Модифицирована и улучшена модель химической эволюции протозвездных объектов.
2. Разработан анализатор скоростей реакций.
3. Реализован метод учета прогрева облака протозвездой.
4. На основе имеющихся наблюдений областей звездообразования TMC-1D и DR21(OH)M определены их химические возрасты, причем для DR21(OH)M это сделано впервые.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Число страниц в диссертации 131, рисунков 29, таблиц 8. Список литературы состоит из 113 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обсуждается актуальность темы диссертационной работы, описываются цели и задачи, поставленные перед автором работы, предмет и методология исследований, обсуждается новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость. Представлена информация по апробации результатов и научным публикациям по результатам исследований, указан личный вклад соискателя. Приводится краткий обзор содержания диссертации.

Глава 1: Представлены результаты применения метода химического моделирования к областям звездообразования ТМС-1, хорошо изученной области формирования звезд малой массы, и DR21(OH), области формирования массивных звезд, малоизученной с химической точки зрения. При сравнении результатов расчетов с данными наблюдений проанализированы лучевые концентрации десятков молекул, начиная с простых двухатомных и до сложных органических соединений. Показано, что используемая химическая модель корректно воспроизводит обилия большинства исследованных компонентов. Определены химические возрасты исследуемых областей, причем для DR21(OH) это сделано впервые. Результаты опубликованы в работах [A1,A3].

Глава 2: В этой главе исследуется, насколько усложнение моделей приводит к различиям в результатах химического моделирования и каковы границы возможностей химического моделирования по определению эволюции физических параметров и текущего состояния протозвездных объектов. Выявлено, что усложнение моделей не вносит существенного вклада в количественное изменение химического состава плотной оболочки вокруг протозвезды. Спустя несколько десятков лет с начала эволюции в облаке устанавливается равновесный химический состав, не чувствительный к изменениям, вносимым усложнениями моделей. Однако несмотря на одинаковые содержания молекул в моделях различных сложностей, существует способ определить физические условия в облаке опираясь на наблюдения спектральных линий. Существуют компоненты, интенсивности линий которых особенно чувствительны к условиям возбуждения даже в холодном облаке. Такие компоненты могут служить индикаторами процессов, происходящих в облаке. Одним из таких индикаторов может являться метанол, что делает наблюдения метанола особо важными для диагностики состояния региона звездообразования. Результаты опубликованы в работе [A4].

Глава 3: Космические органические молекулы в значительной степени формируются на поверхности пылинок, потому в астрохимическом

моделировании важно правильно учитывать поверхностные процессы. Реальные межзвездные пылинки различаются как по размерам, так и по химическим и физическим параметрам, однако в большинстве моделей рассматриваются пылинки только одного размера и с одинаковой равновесной температурой. В данной главе проводится исследование корректности применения такого подхода: в дополнение к классическим пылевым частицам с радиусом в 0.2 микрон, в расчет было включено принципиальное иное второе население пыли с размером пылинок в 30 ангстрем и более высокой температурой. Было исследовано влияние сложного состава пыли на общую эволюцию молекулярного состава дозвездного ядра и содержание сложных органических соединений. Показано, что различные группы компонентов по-разному реагируют на присутствие мелких пылинок. На ранних стадиях разница определяется преимущественно изменением баланса в фотопроцессах благодаря эффективному поглощению пылинками второго населения ультрафиолетовых фотонов, а также в столкновительных реакциях с пылевыми частицами. На поздних стадиях вклад в различия также вносит возрастающее доминирование дополнительных каналов реакций. Результаты опубликованы в работе [A2].

Глава 4: В данной главе исследована чувствительность ряда особенностей химической эволюции молекулярного облака к элементному химическому составу. Рассмотрено четыре модели — модель с высокой металличностью, эволюция которой протекает исключительно в газовой фазе, две модели с низкой металличностью, процессы в которых протекают как в газовой фазе, так и на поверхности пылинок, а также модель с низкой металличностью и искусственно заниженным содержанием кислорода. Одна из моделей с низкой металличностью изначально содержит только нейтральные компоненты. В другой модели учитывается начальная ионизация атомов тяжелых элементов. Для исследования чувствительности использована сетка химических реакций, включающая подробное описание химии дейтерированных соединений. Показано, что начальный состав так или иначе сказывается на химической эволюции большинства компонентов, но иногда его влияние незначительно. Большее значение имеет включение тех или иных химических факторов, например, поверхностных реакций и деплиции значительной части атомов тяжелых химических элементов в пылинках. Однако имеются компоненты, на которые влияет даже незначительное изменение в начальном и элементном составе. Одним из таких компонентов является ион DCO^+ . Его эволюция чувствительна к начальной степени ионизации атомов тяжелых элементов даже при условии идентичного набора про-

текающих реакций и сходного элементного состава. Также рассмотрена возможность использования молекул HD и HF в качестве индикаторов наличия молекулярного водорода. Показано, что в рассмотренных физических условиях молекула HF надежно прослеживает наличие молекулы H_2 на временах, превышающих 10^5 лет. Молекула HD при плотностях характерных для протозвездных облаков надежным индикатором H_2 не является. Результаты опубликованы в работе [A5].

В **Заключении** суммированы основные результаты работы. Приведены рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Основные результаты диссертации:

Соискателем проведено комплексное исследование возможностей определения параметров областей звездообразования путем химического моделирования. Проведено моделирование и определены химические возрас- ты значительно различающихся между собой областей звездообразования TMC-1 и DR(21)OH. Определены границы возможностей химического моделирования по определению эволюции физических параметров и текущего состояния протозвездных объектов. Выявлено, что усложнение моделей не вносит существенного вклада в количественное изменение химического состава плотной оболочки вокруг протозвезды. Определены компоненты, способные служить индикаторами процессов, происходящих в облаке. Исследован вклад мелких пылинок в химическую эволюцию области звездообразования. Показано, что различные группы компонентов по-разному реагируют на присутствие пыли мелких пылинок. Исследована чувствительность ряда особенностей химической эволюции молекулярного облака к элементному химическому составу. Показано, что начальный состав так или иначе сказывается на химической эволюции большинства компонентов, но иногда его влияние незначительно. Большее значение имеет включение тех или иных химических факторов, например, поверхностных реакций и деплиции значительной части атомов тяжелых химических элементов в пылинках. Выявлен компонент, способный служить индикатором начальной степени ионизации атомов тяжелых элементов. Рассмотрена возможность использования молекул HD и HF в качестве индикаторов наличия молекулярного водорода. Итогом работы также является выработка программного инструмента, пригодного как к качественной диагностике условий в областях образования, так и к предоставлению теоретических рекомендаций исследователям и наблюдателям.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- [A1] Кочина, О.В., Вибе, Д.З., Каленский, С.В., Васюнин А.И. Моделирование образования сложных молекул в протозвездных молекулах // *Астрономический журнал*. — 2013. — Т. 90, № 11. — С. 892 – 906.
- [A2] Кочина О. В., Вибе Д. З. Пылинки различных размеров и химическая эволюция протозвездных объектов // *Астрономический журнал*. — 2014. — Т. 91, № 4. — С. 287 – 298.
- [A3] O. Kochina, D. Wiebe Organic Compounds in Star Forming Regions // *Origins of Life and Evolution of Biospheres*. — 2014. — V.44. — P. 169 – 174.
- [A4] Кочина, О.В., Вибе, Д.З. Возможности диагностики эволюционных стадий протозвездного объекта по наблюдениям сложных молекул // *Астрономический журнал*. — 2015.— Т. 92 № 8. — С. 635 – 645.
- [A5] Кочина, О.В., Вибе, Д.З. Метод диагностики элементного состава протозвездных объектов // *Астрономический журнал*. — 2017. — Т. 94, № 2 – С. 114 – 126.

Другие публикации автора по теме диссертации

- [B1] Кочина О. В., Вибе Д. З. Васюнин А. И. Моделирование образования сложных молекул в протозвездных объектах // *Сборник трудов 41-я студенческой научной конференции “Физика космоса”*. — 2012. — С. 244.
- [B2] Кочина О. В., Вибе Д. З. Возможности диагностики эволюционной стадии молекулярного облака // *Сборник трудов 44-я студенческой научной конференции “Физика космоса”*. — 2015. — С. 209.
- [B3] Кочина О. В., Вибе Д. З. Возможности диагностики начального элементного состава протозвездного объекта по наблюдениям сложных молекул // *Сборник трудов 45-я студенческой научной конференции “Физика космоса”*. — 2016. — С. 252.

Цитируемая литература

1. *Leung, C. M., Herbst, E., Huebner, W. F.* Search for Interstellar monohydric Thiols // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1984. V. 56. P. 231.
2. *Herbst, E. & Leung, Ch. M.* Gas Phase Production of Complex Hydrocarbons, Cyanopolynes, and Related Compounds in Dense Interstellar Clouds // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1989. V. 69. P. 271.
3. *Васюнин, А. И., Соболев, А. М., Вубе, Д. З. и др.* О влиянии неточностей скоростей химических реакций на результаты астрохимического моделирования // *Письма в Астрон. журн.* 2004. Т. 30. С. 623.
4. *Vasyunin, A. I., Semenov, D., Henning, Th. et al.* Chemistry in protoplanetary disks: A sensitivity analysis // *Astrophys. J.* 2008. V. 672. P.629.
5. *Bergin, E. A., Langer, W. D., Goldsmith, P. F.* Gas-Phase Chemistry in Dense Interstellar Clouds Including Grain Surface Molecular Depletion and Desorption // *Astrophys. J.* 1995. V. 441. P. 222.
6. *Rawlings, J. M. C., Hartquist, T. W., Menten, K. M. et al.* Direct diagnosis of infall in collapsing protostars - I. The theoretical identification of molecular species with broad velocity distributions // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 1992. V. 255. P. 471.
7. *Viti, S. & Williams, D. A.* Chemical evolution ahead of Herbig-Haro objects // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 1999. V. 305. P. 755.
8. *Chakrabarti, S. & Chakrabarti, S. K.* Can DNA bases be produced during molecular cloud collapse? // *Astron. and Astrophys.* 2000. V. 354. L6.
9. *Shalabiea, O. M., Greenberg, J. M.* Chemical evolution of free-fall collapsing interstellar clouds: pseudo and real time dependent models // *Astron. and Astrophys.* 1995. V. 303. P.233.
10. *Awad, Z., Viti, S., Bayet, E. et al.* Deuterium chemistry of dense gas in the vicinity of low-mass and massive star-forming regions // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2014. V. 275. P. 443.

11. *Tornow, C., Gast, P., Motschmann, U. et al.* Water formation in early solar nebula: II-Collapsing cloud core // Planetary and Space Science. 2014. V. 233. P. 98.
12. *Tassis, K., Willacy, K., Yorke, H. W. et al.* Non-equilibrium Chemistry of Dynamically Evolving Prestellar Cores. I. Basic Magnetic and Non-magnetic Models and Parameter Studies // Astrophys. J. 2012. V. 753. ID. 29.
13. *Ceccarelli, C., Hollenbach, D J., Tielens, A G. G. M.* Far-Infrared Line Emission from Collapsing Protostellar Envelopes // Astrophys. J. 1996. V. 471. P. 400.
14. *Aikawa, Y., Herbst, E., Roberts, H. et al.* Molecular Evolution in Collapsing Prestellar Cores. III. Contraction of a Bonnor-Ebert Sphere // Astrophys. J. 2005. V. 620. P. 330.
15. *Garrod, R. T., Weaver, S. L. W., Herbst, E.* Complex Chemistry in Star-forming Regions: An Expanded Gas-Grain Warm-up Chemical Model // Astrophys. J. 2008. V. 283. P. 682.
16. *Vasyunina, T., Vasyunin, A. I., Herbst, E. et al.* Organic species in Infrared Dark Clouds // Astrophys. J. 2014. V. 85. P. 750.
17. *Das, A., Chakrabarti, S. K., Acharyya, K. et al.* Time evolution of simple molecules during proto-star collapse // New Astronomy. 2008. V. 13. P. 457.
18. *Shematovich, V.I., Shustov, B.M., Wiebe, D.S.* Self-consistent model of chemical and dynamical evolution of protostellar clouds // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1997. V. 292. P.601.
19. *Van Weeren, R. J., Brinch, C., Hogerheijde, M. R.* Modeling the chemical evolution of a collapsing prestellar core in two spatial dimensions // Astron. and Astrophys. 2009. V. 497. P. 773.
20. *Lim, A. J., Rawlings, J. M. C., Williams, D. A.* Numerical hydrodynamics with a parallel integrated chemistry - I. A shear boundary layer // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 1999. V. 308. P. 1126.
21. *Glover, S. C. O, Mac Low, M. M.* On the relationship between molecular hydrogen and carbon monoxide abundances in molecular clouds // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2011. V. 412. P. 337.

22. *Bruderer, S., Benz, A. O., Doty, S. D. et al.* Multidimensional Chemical Modeling of Young Stellar Objects. II. Irradiated Outflow Walls in a High-Mass Star-Forming Region // *Astrophys. J.* 2009. V. 700. P. 872.
23. *Markwick, A. J., Millar, T. J., Charnley, S. B.* On the Abundance Gradients of Organic Molecules along the TMC-1 Ridge // *Astrophys. J.* 2000. V. 535. P. 256.
24. *Acharyya, K., Hassel, G. E., Herbst, E.* The Effects of Grain Size and Grain Growth on the Chemical Evolution of Cold Dense Clouds // *Astrophys. J.* 2011. V. 15. P. 732.

Благодарности

Автор выражает благодарность своим коллегам и соавторам Д. Вибе, Я. Павлюченкову, В. Акимкину, Д. Семенову, А. Васюнину, С. Каленскому за помощь и плодотворное сотрудничество.