

ОТЗЫВ

официального оппонента Зинченко Игоря Ивановича, заведующего отделом,
отдел № 180 «Радиоприёмной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии»
Отделения «Физики плазмы и электроники больших мощностей»
Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»,
на диссертацию Кирсановой Марии Сергеевны на тему
«Многоволновые исследования структуры и кинематики областей образования
массивных звезд», представленную на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук по специальности
1.3.1 – «Физика космоса, астрономия».

Массивные звёзды играют огромную роль в эволюции галактик, начиная активно воздействовать на окружающую среду уже на этапе формирования. Изучение жизненного цикла таких звёзд, включая самые ранние этапы, является одной из важнейших задач астрофизики. При этом как теоретическое осмысление процесса образования массивных звёзд, так и его наблюдательные исследования сталкиваются с большими трудностями. Области образования массивных звёзд содержат различные компоненты (молекулярный, атомарный и ионизованный газ, пыль), которые наиболее ярко проявляются в разных диапазонах электромагнитного спектра. Для достаточно полного понимания характеристик таких областей и происходящих там процессов необходимы наблюдения в различных диапазонах длин волн. Диссертационная работа М. С. Кирсановой как раз посвящена многоволновым исследованиям областей образования массивных звёзд в диапазонах от радио до оптического. Работа включает в себя как наблюдения таких областей, так и моделирование наблюдательных данных с целью определения характеристик изучаемых объектов, что потребовало развития соответствующих моделей.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Во введении обосновывается актуальность работы, описываются её цель, задачи, научная новизна, научная и практическая значимость, личный вклад соискателя, излагаются положения, выносимые на защиту, и приводится список публикаций автора.

Первая глава посвящена выбору объектов для детального исследования. В основном выбирались подходящие области, относящиеся к спиральному рукаву Персея. Этот выбор представляется удачным, поскольку расстояние до этого рукава сравнительно невелико, объекты расположены на северном небе, что делает их доступными для наблюдений на российских инструментах. Расположение во внешней части Галактики снижает вероятность наложения других источников. Индикатором ранней стадии образования массивной звезды считалось наличие метанольного мазера класса II, что является распространённым критерием. Была подготовлена выборка соответствующих мазерных источников и проведены наблюдения большинства из них в линиях $^{13}\text{CO}(1-0)$ и $\text{CS}(2-1)$ при помощи 20-м радиотелескопа Обсерватории Онсала в Швеции. Для других используются данные из литературы. Проведено любопытное сравнение скоростей тепловых и мазерных линий, которое показало, что в некотором интервале галактической долготы наблюдается сдвиг скоростей в одну сторону у всех источников. Предполагается, что это может быть связано с расширением сверхоболочек. Для дальнейшего исследования отобраны несколько областей, даётся их описание. Помимо объектов из рукава Персея для детального изучения выбраны хорошо известные объекты: область фотодиссоциации (ФДО) Барьер Ориона и область ионизованного водорода (HII) RCW120.

Как отмечено выше, диссертационная работа включает в себя моделирование исследуемых областей, и вторая глава диссертации посвящена разработке химико-динамической модели областей HII, которая получила название MARION. Модель раздельно учитывает

динамику газа и пыли, а также химические реакции под действием УФ излучения. Она воспроизводит распространение фронтов ионизации, диссоциации, ударной волны в сочетании с химическими трансформациями вблизи массивных звёзд. Модель использована для объяснения некоторых особенностей, наблюдаемых в Барьере Ориона. Показано, что воспроизвести наблюдения можно только в динамической модели ФДО.

В последующих главах диссертации описываются наблюдения избранных объектов в различных диапазонах длин волн, приводятся и анализируются их результаты. Третья глава посвящена наблюдениям в оптическом диапазоне. Они выполнялись на телескопах САО РАН. Основное здесь – это исследование трёхмерной структуры изучаемых областей звёздообразования. Это делается на основе сопоставления оценок ослабления в оптическом диапазоне с архивными данными о поглощении в дальнем ИК диапазоне. Используются также данные об излучении молекул CO. В результате удаётся разделить вклад передней и задней стенок в полную лучевую концентрацию нейтрального вещества. Этот подход был применён к области III S235, а также к комплексу S254-S258. В результате сделаны интересные выводы о строении этих областей. Найдено, что некоторые области III со всех сторон окружены плотным нейтральным газом, у других передние и задние стенки отсутствуют. Получены указания на клочковатую структуру плотных оболочек.

В следующей главе приводятся результаты исследований пространственного распределения, кинематики и физических характеристик нейтрального газа в гигантском молекулярном облаке G174+2.5. Эти исследования основаны на наблюдениях ряда молекулярных линий, линий ионов [C II] и [N II], и радиорекомбинационных линий на различных инструментах (20-м радиотелескопе Обсерватории Онсала, 100-м радиотелескопе GBT, самолётной обсерватории SOFIA, 22-м радиотелескопе Пушинской радиоастрономической обсерватории) по заявкам М. С. Кирсановой. Использовались и некоторые другие доступные данные. Полученные данные моделировались с помощью описанного в главе 2 пакета MARION. Большое внимание уделяется выявленному в этой области массивному волокну WB673. Найдены признаки гравитационного сжатия вдоль волокна, определены физические параметры сгустков в волокне. Изучены строение и кинематика областей III. При помощи модели MARION удалось воспроизвести их физические параметры и наблюдаемые интегральные интенсивности линий в ФДО. Исследованы также распределение и обилие малоатомных углеводородов C₂H и c-C₃H₂.

В пятой главе диссертации структура и кинематика комплексов звёздообразования изучается по наблюдениям в ближнем ИК диапазоне. Наблюдения линий H₂ и некоторых других проводились на 2.5-м телескопе Кавказской Горной Обсерватории ГАИШ МГУ. В области S255, S257 проведены также наблюдения миллиметровых линий C₂H. На ИК изображениях наблюдаются различные детали в виде компактных сгустков, оболочек и дуг. Определены физические характеристики некоторых из них. Наблюдения C₂H указывают на то, что оболочка вокруг S255 медленно расширяется.

Последняя, шестая глава диссертации посвящена исследованию области III RCW120. Этот объект, расположенный на южном небе, имеет почти кольцеобразную форму и часто рассматривался, как хороший кандидат для исследований звёздообразования, индуцированного расширяющейся областью III. В диссертационной работе он исследовался на основе наблюдений молекулярных линий при помощи 12-м радиотелескопа APEX (Atacama Pathfinder EXperiment). На основе численного моделирования показано, что модель сферической оболочки не воспроизводит наблюдаемые интенсивности линий. Подходящей моделью является тороидальная структура, наблюдаемая плазма. Однако при этом всё-таки требуется наличие поглощающего газа на луче зрения. По наблюдениям высоковозбуждённых линий CO(6-5) и ¹³CO(6-5) выявлен слой плотного молекулярного газа, сжатого расширяющейся областью III. Однако показано, что образование массивных молодых звёздных объектов, наблюдаемых вокруг RCW120, не индуцировано расширением области III.

В Заключение сформулированы основные выводы работы и рассматриваются перспективы дальнейших исследований на основе полученных результатов. В Приложениях

приводятся карты отношения сигнал/шум при наблюдениях оптических линий, спектры в оптическом диапазоне, карты шума на 3 мм и 2 мм, статистические суммы, использовавшиеся для расчётов лучевых концентраций молекул и вращательные диаграммы для линий метанола.

Из вышеизложенного видно, что М. С. Кирсановой проведена очень большая комплексная работа по исследованию избранных областей образования массивных звёзд в различных диапазонах. Все исследования выполнены на высоком научном уровне. М. С. Кирсанова продемонстрировала высокую квалификацию и как наблюдатель (причем в разных диапазонах), и как теоретик, разработавший численную модель нестационарных областей НII и успешно применивший её для анализа данных наблюдений. Всё это позволило получить ряд важных результатов, которые вносят большой вклад в исследования межзвёздной среды и процессов звёздообразования. Среди них кратко можно выделить следующее.

1. Реализован многоволновой подход к изучению областей образования массивных звёзд, основанный на использовании наблюдательных данных в оптическом, инфракрасном и радиодиапазонах. Этот подход позволяет восстанавливать трёхмерную структуру объектов, что успешно продемонстрировано в диссертации.

2. Разработана численная модель нестационарных областей НII и фотодиссоциационных оболочек. Модель раздельно учитывает динамику газа и пыли, а также химические реакции под действием УФ излучения. Она воспроизводит распространение фронтов ионизации, диссоциации, ударной волны в сочетании с химическими трансформациями вблизи массивных звёзд. Модель успешно использована в диссертации для ряда областей.

3. Впервые детально исследована трёхмерная структура и кинематика областей НII и их нейтральных оболочек в нескольких областях образования массивных звёзд. Показано, что нейтральный газ вокруг исследованных областей НII имеет клочковатую структуру.

4. Показано, что форма плотной молекулярной оболочки области НII RCW120 близка к тороидальной, а не к сферической, как обычно предполагается. Показано, что звёздообразование на периферии RCW120 началось независимо от распространения ударной волны от расширяющейся области НII.

Достоверность результатов не вызывает сомнений. Она обеспечивается использованием передовых, хорошо отлаженных инструментов, апробированных методов обработки и анализа данных, сопоставлением с результатами других авторов. Также стоит отметить, что все основные результаты опубликованы в ведущих рецензируемых астрономических журналах (опубликовано 22 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, из них более половины в журналах первого квартиля).

Замечаний по основным результатам и выводам работы у меня нет. В то же время в работе имеются некоторые неточности и огрехи в оформлении.

1. Предположение о том, что разные компоненты в комплексе S255-S257 отстоят друг от друга по крайней мере на десятки парсек вдоль луча зрения (стр. 91) неубедительно с учётом неопределённостей оценок расстояний, да и плохо согласуется с анализом взаимодействия разных компонент, проводимом в диссертации. При этом расстояния в этом разделе приведены в очень странной форме. Они даны с верхними и нижними индексами, которые обычно означают несимметричные погрешности. Но здесь это верхние и нижние пределы расстояний, причем нижние пределы почему-то приводятся со знаком «минус». В других разделах диссертации этого нет и индексы, как принято, означают погрешности.

2. Некоторые подходы следовало бы пояснить. Например, выбор линий SII для оценки электронной концентрации, выбор начального отношения массы разных компонент пыли к массе газа (стр. 48).

3. В работе довольно много опечаток, в том числе существенных. В определениях гиперкомпактных и ультракомпактных зон НII (стр. 2) знаки неравенства должны быть заменены на противоположные. К опечаткам можно отнести и ошибки в формулах (3.7) и (4.13). Почти во всей диссертации объект S254 многократно называется S234.

5. В списке литературы пункты 141 и 145 дублируют друг друга.

Аннотация. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

И.И. Зинченко

Ученый секретарь ИПФ РАН



И.В. Корюкин