

## **ОТЗЫВ официального оппонента**

о диссертации Плакитиной Каролины Владимировны на тему:  
«Органические молекулы в горячих ядрах молекулярных облаков»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

**Актуальность работы.** Диссертационная работа К. В. Плакитиной посвящена исследованию химического состава и физических характеристик областей образования массивных звезд, в частности, области RCW120, на основе наблюдательных данных телескопов APEX и Herschel. Значительная часть работы посвящена использованию методов машинного обучения для классификации эволюционных стадий молекулярных облаков на основе данных по излучению в линиях молекул и ИК-излучению. Массивные звезды являются достаточно редкими объектами в Галактике, но при этом они оказывают огромное влияние на эволюцию окружающей межзвездной среды из-за своего мощного УФ-излучения, чем и обусловлена важность и актуальность изучения этих объектов. Особый интерес представляет ранняя фаза формирования массивных звезд – фаза горячего ядра. Горячие ядра еще более редки (их известно около ста штук), и характеризуются богатыми молекулярными спектрами излучения, в которых присутствуют многочисленные линии различных молекул, в том числе сложных органических молекул. Изучение стадии горячего ядра важно для развития астрохимических моделей эволюции вещества в областях звездообразования. Совместный анализ наблюдательных данных по молекулярным линиям и астрохимическое моделирование, представленные в диссертации, позволяют определять физические параметры среды и проследивать пути образования молекул (Главы 1 и 2). Использование машинного обучения для поиска закономерностей в большой выборке молекулярных облаков открывает новые возможности для массового анализа накопленных массивов данных (Глава 3).

Все перечисленное выше делает данную диссертационную работу весьма актуальной и востребованной.

**Научная новизна и значимость** работы заключается, прежде всего, в построении подробных карт распределения излучения 35 молекул в 95 линиях в области образования массивных звезд RCW120, причем 24 молекулы были обнаружены в этом источнике впервые. На основе анализа этих карт, а также профилей спектральных линий, автору удалось выявить пространственную дифференциацию излучения в линиях разных молекул, а также обнаружить признаки биполярных истечений в молодых звездных объектах S1 и S2. При помощи метода вращательных диаграмм были определены вращательные температуры и лучевые концентрации молекул, что позволило выявить различия в физических условиях вблизи разных молодых звездных объектов (МЗО) в области RCW120. Оказалось, что различные молекулы трассируют слои вокруг МЗО с разной температурой газа, и это напоминает «луковичную» структуру: наиболее горячий газ (с температурой до 61 К) прослеживается по линиям  $\text{CH}_3\text{CN}$ , за ним следуют  $\text{OCS}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{CCN}$  и другие молекулы, а наиболее холодные слои (11-19 К) видны по линиям  $\text{SiO}$ . Следующий важный новый результат диссертации заключается в том, что впервые была выявлена химическая дифференциация газа в области RCW120. Было обнаружено, что в южной части облака (вблизи МЗО S1) содержание метанола значительно выше, чем в северной (вблизи МЗО S2). С помощью моделирования было доказано, что это вызвано эффективной фотодесорбцией и ударными волнами, разрушающими ледяные мантии пылинок в южной части, тогда как в северной части преобладает тепловая десорбция. Еще одним новым и очень важным результатом работы является выделение устойчивых эволюционных групп молекулярных облаков методами машинного обучения на основе интегральных интенсивностей линий шести молекул ( $\text{HCO}^+$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{HNC}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{C}_2\text{H}$  и  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$ ). Автору удалось выделить три устойчивых кластера среди более чем 3500 объектов из каталога MALT90: протозвезды без УФ-излучения, протозвезды с УФ-излучением (области Н II и области фотодиссоциации), а

также области без активного звездообразования. Кроме того, методами машинного обучения впервые была определена наиболее вероятная эволюционная стадия 512 молекулярных облаков из обзора MALT90, которые ранее не были классифицированы. Установлено, что около 80% таких объектов относятся к облакам без активного звездообразования.

Дополнительно к вышесказанному хотелось бы отметить еще несколько интересных с моей точки зрения результатов. Во-первых, это определение значимости некоторых молекул как индикаторов разных эволюционных стадий. Оказалось, что главную роль в разделении облаков на эволюционные группы в процессе машинного обучения играют линии  $C_2H$  и  $N_2H^+$ . Молекула  $C_2H$  важна для идентификации объектов, подверженных влиянию УФ-излучения, а молекула  $N_2H^+$  зондирует плотный холодный газ. Во-вторых, интересно обнаруженное астрохимическое сходство облаков разных масс. Оказалось, что разделение на кластеры не зависит от потоков в дальнем ИК-диапазоне, что свидетельствует о схожести химических процессов в облаках с разной массой. Классификация облаков по ИК-признаку зачастую является основным методом определения их эволюционной стадии, но, как показано в данной работе, она не может быть окончательной, поскольку температура пыли отражает некое усредненное состояние области. Излучение в линиях молекул позволяет более четко разделить эволюционные стадии объектов, независимо от их массы. В-третьих, я считаю важным результатом работы подтверждение отношения интенсивностей линий  $HCN/HNC$  как индикатора эволюционной стадии объектов, на основе анализа данных обзора MALT90 для трех выявленных кластеров. Это отношение возрастает по мере эволюции объектов (от 1.31 в облаках без звездообразования до 1.61 в областях H II), что позволяет использовать его в качестве «химического термометра» для межзвездной среды.

**Практическая значимость** работы заключается в следующем. Во-первых, создан и успешно апробирован метод автоматической классификации

молекулярных облаков с помощью машинного обучения, что имеет важное значение в современную эпоху больших астрономических обзоров и, соответственно, больших объемов наблюдательных данных. Во-вторых, в работе представлен массив наблюдательных данных по молекулам в области RCW120 и результатов анализа этих данных, что может быть использовано другими исследователями для сравнения с параметрами других областей звездообразования в Галактике. В-третьих, проведенный корреляционный анализ лучевых концентраций молекул и астрохимическое моделирование позволили выявить пути формирования различных молекул в газовой фазе и на поверхности пыли, что имеет важное значение для развития и уточнения химико-эволюционных моделей звездообразования.

**Достоверность** представленных результатов подтверждается их успешной апробацией на международных и российских конференциях и профильных семинарах, а также публикацией в рецензируемых научных журналах. Также достоверность подтверждается тем, что автор использует данные астрономических наблюдений, полученные на телескопах мирового уровня (APEX, Herschel, Spitzer). Кроме того, в работе применяются хорошо известные стандартные методы анализа спектроскопических (APEX) и фотометрических (Spitzer) наблюдений, которые широко используются научным сообществом. Для работы с данными автор использует стандартные программные пакеты, такие как apexOnlineCalibrator, CLASS (GILDAS), Astropy, APLpy. Для реализации алгоритмов машинного обучения использовалась библиотека Scikit-learn и применялись методы QuantileTransformer, t-SNE, HDBSCAN, случайный лес (Random Forest), градиентный бустинг (Gradient Boosting). Для астрохимического моделирования автор использовала программный код Presta, который успешно применяется другими авторами.

У меня есть ряд замечаний к диссертационной работе.

1. Во введении стоило бы упомянуть более современные обзоры по тематике образования массивных звезд, помимо ставших уже классическими обзоров авторов Zinnecker, Yorke и др. Например, Motte, Bontemps, Louvet «*High-Mass Star and Massive Cluster Formation in the Milky Way*», *Annual Review Astronomy and Astrophysics*. 56:41-82 (2018); Beuther, Kuiper, Tafalla, «*Star Formation from Low to High Mass: A Comparative View*», *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 63:1-44 (2025). Также уместно было бы упомянуть более свежую и актуальную статью по каталогу ATLASGAL: Urquhart, J. S. et al. «*ATLASGAL - evolutionary trends in high-mass star formation*», *MNRAS*, vol. 510, no. 3, pp. 3389-3407 (2022).
2. Во введении говорится: «Существуют несколько теорий формирования массивных звезд, но ни одна из них не является общепринятой на данный момент». Однако, не приводится никаких ссылок и не упоминаются хотя бы кратко эти модели. Можно было привести ссылку, например, на цитируемую работу Tan, J. C., «*Massive Star Formation*», in *Protostars and Planets VI*, 2014, pp. 149-172. В этом обзоре рассматриваются модели формирования массивных звезд. Есть и другие современные работы на эту тему.
3. На стр. 3 и далее по тексту употребляется термин «темные инфракрасные облака», который является прямым переводом с английского «infrared dark clouds» (IRDC). Буквально он означает «облака, темные в инфракрасном диапазоне», поскольку они были открыты телескопом Спитцер как темные области на фоне излучения Галактики в ИК диапазоне. Насколько мне известно, не существует удачного перевода этого термина на русский язык, и поэтому стоило бы пояснить его значение в тексте и привести английский аналог.
4. В разделе «Цели диссертации» написано: «Особое внимание уделяется исследованию области образования массивных протозвёзд...», но не

- сказано какой конкретно области – RCW120. Там же: можно подумать из логики текста, что предложение «Для ускорения обработки данных...» относится к рассматриваемой области RCW120, хотя оно относится к отдельной части диссертации, посвященной применению методов машинного обучения к классификации объектов.
5. В разделе «Методы исследования» впервые упоминается каталог MALT90, но не дана расшифровка аббревиатуры и нет соответствующей ссылки. Далее по тексту ссылка дана, но стоило бы привести ее в самом начале. То же относится и к названию maserDB, которое упомянуто в этом разделе впервые и тоже без расшифровки и без ссылки. Ссылка на maserDB встречается дальше, но она не совсем правильная (это тезисы конференции). На странице базы maserDB в разделе «Acknowledgement» прямо указано, какую работу следует цитировать при использовании этой базы, но этой ссылки в диссертации не приводится.
  6. В разделе «Структура диссертации» есть опечатки в количестве страниц (128 вместо 129) и количестве рисунков (34 вместо 35). В автореферате приведены правильные числа.
  7. В разделе «Научная новизна» написано «Впервые было проведено картирование...» и «Впервые построены карты...». Кажется, что это практически одно и то же, и стоило бы объединить эти пункты. Также в списке молекул, использованных для машинного обучения, не хватает еще одной шестой молекулы (в Главе 3 говорится о шести молекулах).
  8. На стр. 10 внизу непонятен смысл фразы: «В условиях активных масштабных исследований перспективной становится задача выявления различий между различными этапами процесса звездообразования».
  9. На рис. 1 отсутствует цветовая шкала, упомянутая в подписи к рисунку. Также не совсем понятно, откуда взято цветное изображение на 70 мкм – оно построено автором или взято из какой-нибудь статьи? Об этом стоило бы написать в пункте 1.2, где впервые упоминается рис. 1. То же относится и к рис. 7. В пункте 2.2 говорится, что автор использовала

- данные из архива Herschel, в том числе на 70 мкм, но эту информацию стоило бы дать и в подписи к рис. 1, и в соответствующем куске текста.
10. На рис. 2 сверху приведена шкала скорости, которая не имеет особого физического смысла, так как она зависит от привязки к конкретной линии.
  11. Стр. 23, первый абзац: «...наблюдается возрастание интегральной интенсивности...». Непонятно, интенсивности чего?
  12. Рис. 7: в подписи к рисунку не хватает информации о размере пикселя.
  13. Рис. 10: не указано, откуда взяты положения молодых звездных объектов. В целом, во всех рисунках стоило бы расширить подписи и привести в них исчерпывающую информацию, чтобы читателю не нужно было обращаться к тексту за деталями при изучении рисунков.
  14. Стр. 37, пункт 2.1.1 – впервые упоминается ATLASGAL, но без расшифровки аббревиатуры. Стоило бы ее привести и дать ссылку сразу (далее по тексту ссылка имеется).
  15. В пункте 2.2.1 говорится, что для расчета содержаний молекул использовались карты лучевых концентраций молекул, но в диссертации они не приводятся. Было бы полезно привести их хотя бы в Приложениях, потому что они представляют интерес.
  16. В пункте 2.2.2 на стр. 60 говорится, что «имеют место различные корреляции в северных и южных пикселях». Осталось не совсем понятно, является ли это просто предположением или корреляции действительно вычислялись отдельно для этих областей? Было бы тогда полезно их привести.
  17. На стр. 64 во втором абзаце говорится, что «содержания молекул ... были сопоставлены с результатами химико-динамического моделирования коллапса протозвезды». Не хватает деталей, что и как было сделано. Также, не приведено, чему равен пространственный масштаб модельного коллапсирующего облака.

18. На стр. 67 упоминается «известный кинетический изотопный эффект». Было бы полезно пояснить немного подробнее про этот эффект или дать подходящую ссылку.
19. В разделе 3.1 говорится, что для анализа использовались сведения о мазерах метанола II класса, но не приводятся пояснений, почему именно эти мазеры были выбраны среди прочих видов мазеров (метанола I класса, водяного пара и пр.). Также говорится, что мазеры брались из кружка 5 угловых секунд вокруг источников, но на самом деле угловой масштаб для разных источников соответствует разному линейному масштабу из-за разных расстояний. Вероятно, 5 угловых секунд с запасом покроют все возможные мазеры  $\text{CH}_3\text{OH}$  II класса вокруг любого источника в Галактике, но это сходу не очевидно, и об этом стоило бы явно написать и дать характерные линейные расстояния от протозвезд до мазеров.
20. Касательно мазеров, на стр. 83 говорится, что включение этого признака позволило разделить кластер «протозвезды» на две группы: источники, связанные с мазерами, и источники без мазеров, что было ожидаемо. Однако, не хватает сделанного вывода из этого факта (хотя в заключении кое-что говорится о выявлении наиболее активных областей по мазерам, просто как факт, без пояснений). В целом было бы очень интересно исследовать корреляцию этого признака с другими признаками внутри соответствующей подгруппы.
21. Рис. 29 и в тексте: термин «важность признака» и его численное значение, как мне кажется, стоило бы подробнее расшифровать.
22. В разделе 3.6 на рис. 34 приводятся результаты кластеризации после того, как ранее не присвоенные типы молекулярных облаков были заменены наиболее вероятными, полученными с помощью классификаторов случайного леса и градиентного бустинга. Предлагается сравнить эти результаты с рис. 28 и 30 (на самом деле – с рис. 31, а не 30). Однако, я не вижу никакой разницы между результатами

до и после – рисунки одинаковые. Вероятно, на рис. 34 по ошибке приведены не те данные, и это не позволило увидеть разницу в результатах. В тексте конкретных цифр по количеству объектов в обновленных кластерах (после включения в алгоритм новых классифицированных объектов) я также не нашла. Соответственно, вывод о результатах замены ранее не присвоенных типов облаков, приведенный в первом абзаце на стр. 89, невозможно проверить по рисункам.

23. На стр. 111 в 1-м абзаце говорится, что «Добавление [...] двоичных индикаторов наличия мазеров  $\text{CH}_3\text{OH}$  II класса позволило выделить дополнительный кластер с преобладанием областей фотодиссоциации и областей ионизованного водорода». Но на стр. 106 сказано, что при добавлении индикаторов обнаружения мазеров  $\text{CH}_3\text{OH}$  II класса кластер «Протозвезды» разделяется на две подгруппы, а не ФДО и НII.

24. В тексте имеется небольшое число опечаток и синтаксических ошибок. Например, с. 106, третий абзац: должна быть табл. 7, а не 6 (в таблице 6 нет кластера «Области Н II + ФДО», о котором говорится в этом абзаце).

Все высказанные замечания несколько не умаляют ценности и значимости диссертационной работы К. В. Плаkitиной. Работа представляет собой законченное и оригинальное научное исследование и выполнена на высоком научном уровне. Текст диссертации написан хорошим лаконичным языком, хорошо иллюстрирован. Личный вклад автора во все полученные результаты корректно отражен. Список литературы показывает, что соискатель степени хорошо знакома с современным состоянием исследований по данной теме. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация К. В. Плаkitиной «Органические молекулы в горячих ядрах молекулярных облаков» является научно-квалификационной работой, удовлетворяющей всем требованиям и критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением

Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам). Считаю, что соискатель Плакитина Каролина Владимировна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории спектроскопии межзвездной среды отдела теоретической астрофизики и космологии Астрокосмического центра Физического института им. П.Н.Лебедева Российской академии наук

**ШАХВОРОСТОВА Надежда Николаевна**

10 июня 2026 г.

Контактные данные оппонента:

Тел. +7(916)8394789, e-mail: shahvorostovann@lebedev.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.03.02. Астрофизика и радиоастрономия (физико-математические науки).

Адрес места работы: 119991, ГСП-1, Ленинский пр., 53, ФИАН (АКЦ), тел. +7(495) 333-40-88, office@lebedev.ru.

Подпись сотрудника ФИАН Шахворостовой Н. Н. удостоверяю.

Ученый секретарь ФИАН, к.ф.-м.н.

А. В. Колобов