

ОТЗЫВ официального оппонента

**на диссертационную работу Плакитиной Каролины Владимировны
«Органические молекулы в горячих ядрах молекулярных облаков»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.1 — физика космоса, астрономия**

Диссертация Каролины Владимировны Плакитиной посвящена исследованию химического состава, физических свойств и кинематики газа в горячих ядрах молекулярно-пылевого облака RCW 120, а также использованию современных методов машинного обучения для классификации эволюционных стадий массивных ядер молекулярных облаков в нашей Галактике. Данные исследования объединены общей проблемой построения сценария образования массивных звезд, являющейся одной из ключевых проблем современной астрофизики.

Горячие ядра представляют собой относительно редкие объекты, характеризующие раннюю стадию формирования звезды большой массы. В них наблюдаются линии большого количества молекул, включая сложные органические. Анализ спектральных наблюдений позволяет оценить локальные физические характеристики и химический состав газа в ядрах, в то время как сравнительный анализ пространственных распределений различных параметров на больших масштабах используется для исследования физико-химических процессов в родительском облаке и влияния на них внешних факторов. Сравнение полученных оценок физических и химических характеристик с результатами модельных расчетов позволяет сделать выводы о путях образования и разрушения молекул в ядрах и их окрестностях, что необходимо для понимания процесса образования звезд большой массы.

Рост объема астрономических данных, произошедший за последние годы, привел к тому, что наряду с исследованиями отдельных объектов возникла необходимость анализа данных наблюдений больших выборок объектов определенного класса. Для проведения такого анализа требуются статистические методы, в том числе с использованием современных алгоритмов машинного обучения. Одной из задач, где могут быть использованы алгоритмы машинного обучения, является задача классификации областей звездообразования по эволюционным стадиям.

Указанные выше задачи определяют актуальность диссертационной работы К.В. Плакитиной, в которой исследованы физико-химические свойства горячих ядер в облаке RCW 120 и проведена классификация массивных ядер из каталога MALT90 по эволюционным стадиям с помощью статистических методов и алгоритмов машинного обучения.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объем работы составляет 129 страниц, включая 35 рисунков и 9 таблиц.

В первой главе приведены результаты анализа карт молекулярно-пылевого облака, расположенного вблизи границы области фотодиссоциации, связанной с областью III RCW 120, в нескольких десятках различных молекулярных линий. Наблюдения в диапазоне частот 200 — 260 ГГц были проведены на телескопе APEX-12m (Чили), анализ данных был сделан К.В. Плакитиной. Анализ морфологии областей молекулярного излучения позволил выделить три набора линий, имеющих различную морфологию и чувствительных к различным условиям в наблюдавшейся области. Обнаружены высокоскоростные потоки, связанные с двумя молодыми звездными объектами.

Во второй главе приведены результаты оценок лучевых концентраций молекул в облаке RCW 120 и вращательных температур в направлении молодых звездных объектов (МЗО), связанных с горячими ядрами. Для оценки распределения лучевой концентрации водорода и температуры пыли в облаке

К.В. Плакитина провела анализ данных наблюдений, полученных на телескопе Herschel, а также использовала данные обзора ATLASGAL. Были рассчитаны карты относительных концентраций молекул, а также проведен поиск корреляций между лучевыми концентрациями различных молекул. Обнаружено, что на диаграмме лучевых концентраций метанола и метилацетилена существуют две корреляционные зависимости, соответствующие северной и южной частям облака. Сравнение с результатами астрохимических расчетов в рамках модели Presta позволило сделать вывод об эффективности фотодесорбции при образовании метанола в южной части облака.

Третья глава посвящена применению методов машинного обучения к анализу данных выборки из более чем 3000 объектов из каталога массивных ядер MALT90. Для классификации объектов по эволюционным стадиям были использованы интегральные интенсивности молекул, которые были дополнены ИК-данными с телескопа Spitzer, а также данными о наличии мазеров метанола. Следует отметить, что оценки ИК-потоков всех объектов на длинах волн в диапазоне 3 – 8 мкм и на 24 мкм К.В. Плакитина сделала самостоятельно. Для выявления скрытых закономерностей в наборе данных с помощью нелинейного метода стохастического вложения соседей с t -распределением Стьюдента было проведено снижение размерности массива данных и получены отличные друг от друга кластеры в двумерном пространстве. Сравнение результатов, полученных по пяти наиболее интенсивным линиям для объектов с существующей ИК-классификацией, позволило классифицировать два устойчивых кластера, в одном из которых преобладают объекты с молодыми звездными объектами, а во втором – объекты без признаков звездообразования. Добавление в качестве признака в анализируемый набор интенсивностей линии $\text{H}^{13}\text{CO}^+(1-0)$ позволило разделить кластер объектов с молодыми звездными объектами на кластер протозвезд и кластер с зонами НП и областями фотодиссоциации. Применение данного анализа к объектам, ранее не поддававшимся классификации, позволило впервые

классифицировать более пятисот новых объектов. В основном, это оказались области без признаков звездообразования.

Диссертация К.В. Плакитиной является серьезным научным трудом, в полной мере соответствующим требованиям, необходимым для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Цели и задачи четко сформулированы. В качестве научной новизны следует отметить новые данные наблюдений облака RCW 120 в различных молекулярных линиях, оценки физико-химических свойств газа для различных частей облака, корреляции между лучевыми концентрациями, а также результаты классификации объектов из каталога MALT90, впервые полученные с помощью алгоритмов машинного обучения.

Оценки физических параметров ядер RCW 120 и их химического состава, а также результаты классификации объектов из каталога MALT90 имеют большую практическую значимость и, безусловно, будут использованы специалистами в области физики и химии областей звездообразования. Использованные алгоритмы машинного обучения могут применяться в дальнейшем для классификации различных классов объектов, входящих в большие массивы астрономических данных.

Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечиваются качеством наблюдательных данных, полученных на лучших мировых радио- и ИК-телескопах, детальным анализом данных с помощью общепринятых в астрономическом сообществе программных пакетов (CLASS, Astropy), сопоставлением с имеющимися данными и независимыми оценками, использованием апробированной астрохимической модели и общепринятой библиотеки машинного обучения Scikit-learn. Степень обоснованности научных положений и выводов заслуживает самой высокой оценки.

Результаты диссертации опубликованы в ведущих астрономических журналах, включая две статьи в Астрофизическом Бюллетене и одну статью в журнале Monthly Notices RAS.

По содержанию есть ряд замечаний и вопросов:

- В диссертации нет данных о размерах, массах, плотностях ядер и дисперсиях скоростей газа. Эти данные, однако, были бы весьма полезны, они добавили бы большую точность и ясность в изложение, избавив от вопросов, возникающих по ходу чтения, таких как:
 - «... рассматривались пять МЗО среди которых есть как МЗО промежуточных масс, так и массивные МЗО...» (стр. 14). Массы не указаны.
 - «Обе части содержат спокойный молекулярный газ» (стр. 35). Какие параметры имеет спокойный газ?
 - Каковы размеры компактных областей, ядер, компонент, о которых говорится на стр. 64-65?
 - Каковы плотности рассматриваемых ядер, связанных с МЗО? Так, например, на стр. 67 сказано, что МЗО S2 «... оказывается самой плотной областью». Плотность не указана.
- Уменьшение яркостной температуры линии C18O(2-1) в направлении МЗО S10 и S39 объясняется самопоглощением (стр. 16). На Рис. 3 на соответствующих спектрах нет признаков самопоглощения.
- На стр. 32 указан градиент скорости, равный -1 км/с. Но это не градиент, а разность скоростей. Чтобы рассчитать градиент, необходимо разделить это значение на линейный масштаб.
- На стр. 39 сказано: «Ввиду схожести сечений столкновений температура возбуждения всех изотопов считалась одинаковой. В этом предположении были определены лучевые концентрации молекул CO... и CS». Однако для физических условий в звездообразующих ядрах как столкновительный, так и радиационный механизмы возбуждения могут быть сравнимы. Особенно это касается таких

молекул, как CS, линии которых обычно далеки от ЛТР, а температуры возбуждения изотопов могут быть различны.

- Дискуссионным представляется вывод о слабой корреляции между лучевыми концентрациями CS, C34S и водорода (рис. 23). Визуальный анализ показывает, что карты интегральных интенсивностей CS и C34S (рис. 7) коррелируют с картой лучевой концентрации водорода (рис. 19). Возможно, что недооценка лучевой концентрации C34S связана недооценкой температуры возбуждения в направлении пика интегральной интенсивности. Было бы полезно для сравнения рассчитать карты лучевой и относительной концентрации C34S, приняв температуру возбуждения этой линии равной температуре пыли.

- При расчетах вращательных температур метанол не использовался. Однако, на стр. 63 сказано: «сравнение температур возбуждения CH₃OH, CH₃CSH и CH₃CN позволяет предположить, что метанол присутствует в более холодной и более обширной области вокруг МЗО». Как определялись температуры возбуждения метанола?

- Представление о химико-тепловой структуре горячих ядер S1 и S2, напоминающей луковицу (стр. 63), может быть не единственным. На меньших масштабах ядра могут быть неоднородны и состоять из мелких фрагментов с различным химическим составом (о мелкомасштабной фрагментации ядра S2 говорится на стр. 64).

- Как учитывалась структура объектов каталога MALT90 (наличие нескольких ядер, протяженных структур на картах)? Поскольку положения пиковых интенсивностей HCO⁺ и N₂H⁺ в некоторых объектах MALT90 не совпадают, какой позиции в таких случаях соответствовали интенсивности линий, используемые в качестве признака?

В тексте встречаются ошибки:

- “Переходы $J \rightarrow J - 1$ с одинаковыми значениями K близки по частоте” (Стр. 37). Правильно: “с различными значениями”.
- Стр. 43: «В МЗО S39 ... температуры молекул H_2CS и SO в пределах ошибок совпадают и равны 13–14 К». Сложно говорить о совпадении, когда T_{rot} для H_2CS в S39 равна 32 ± 20 К, а для SO 12 ± 2 К (Рис. 18 и Табл. 3).
- Интегральные интенсивности ряда молекул (SO_2 , OCS , HC_3N и др.) в Таблице на стр. 50-51, по-видимому, даны в единицах мК км/с, а не в К км/с, как указано в заголовке.
- Диапазон оптического поглощения при расчетах с помощью модели Presta указан «от 3 до 10^6 звёздных величин» (стр. 61). По-видимому, ошибка в верхнем пределе.
- Чему соответствуют проценты по оси абсцисс на Рис. 28? Они не совпадают со значениями, рассчитанными из чисел, приведенных в столбцах.
- Рис. 31 совпадает с Рис. 34.
- Диссертация хорошо оформлена. Орфографических и синтаксических ошибок в тексте практически нет. На мой взгляд, объемные таблицы 1 и 9 было бы лучше поместить в приложение, они не являются необходимыми в основном тексте.


Указанные недочеты не снижают общей положительной оценки работы.

Диссертация Плакитиной Каролины Владимировны «Органические молекулы в горячих ядрах молекулярных облаков», является законченным научным квалификационным трудом, выполненным под руководством доктора физико-математических наук М.С. Кирсановой. В нем содержатся новые астрономические данные и результаты анализа, полученные, в частности, с помощью статистических методов и алгоритмов машинного обучения.

Результаты, представленные в диссертации, доложены на ряде российских и международных конференций, опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК. Диссертация К.В. Плакиной была представлена 29 мая 2026 года на семинаре отдела радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии Института прикладной физики РАН и получила положительную оценку. Она удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.3.1 – физика космоса, астрономия, а ее автор, Плакина Каролина Владимировна, безусловно заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук. Результаты диссертационной работы представляют интерес для специалистов в области физики и химии областей звездообразования и астрохимии, а также астрономов, занимающихся анализом больших баз наблюдательных данных. Они могут быть использованы в ИНАСАН, АКЦ ФИАН, ГАИШ МГУ, УрФУ, ФТИ РАН, ИПФ РАН и других организациях. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Отзыв составлен ведущим научным сотрудником отдела радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии Института прикладной физики РАН, доктором физико-математических наук Львом Евгеньевичем Пироговым.

В.н.с. д.ф.-м.н.

 Л.Е. Пирогов
03.06.2026

подпись Л.Е.Пирогова заверяю

ученый секретарь ИПФ РАН, к.ф.-м.н.

 И.В. Каролиц

603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

тел. +7(831)4164741, email: pirogov@ipfran.ru