

«УТВЕРЖДАЮ»:

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН А.А. Федянин



ОТЗЫВ

ведущей организации

(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1) на диссертационную работу ПЛАКИТИНОЙ Каролины Владимировны на тему «Органические молекулы в горячих ядрах молекулярных облаков» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.1. Физика космоса, астрономия»

Диссертационная работа Плакитиной Каролины Владимировны «Органические молекулы в горячих ядрах молекулярных облаков» состоит из Введения, трех глав и Заключения. Полный объем диссертации составляет 128 страниц, включая 35 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 157 наименований.

Диссертация посвящена исследованию физических и химических параметров межзвездной среды (МЗС) в области образования массивных звезд RCW120, а также применению алгоритмов машинного обучения для выявления различных стадий эволюции молекулярных облаков.

Основное содержание диссертационной работы

Во **Введении** приведено общее описание диссертации, обзор современного состояния исследований МЗС в окрестностях молодых звездных объектов (МЗО), уделяя особое внимание поиску и анализу сложных органических молекул; обосновывается актуальность проводимого

исследования; обсуждаются цели и задачи работы; приводятся основные результаты, выносимые на защиту.

В главе 1 диссертации были проанализированы результаты радионаблюдений на телескопе APEX юго-западной части области RCW120; отождествлены и построены карты излучения 35 молекул, из которых 24 обнаружены в этой области впервые; исследована кинематика газа. По особенностям пространственного распределения выделены три группы молекул: 1) двухатомные и простые углеводородные, наблюдающиеся вдоль всей границы области ионизации, образование которых связано с проникновением УФ-квантов в молекулярный газ; 2) двухатомные и более сложные, чье излучение коррелирует с между излучением пыли на длине волны 870 мкм; 3) большей частью сложные, наблюдающиеся в окрестности МЗО S2 – наиболее яркого источника излучения в исследуемой области, находящегося на ранней стадии формирования горячего ядра. Кинематический анализ широких крыльев спектральных линий молекул – индикаторов ударных волн выявил наличие истечений в областях МЗО, причем вблизи S2 истечение ориентировано вдоль луча зрения, а вблизи S1 – вдоль области фотодиссоциации (ФДО) (в картинной плоскости). Анализ диаграмм «позиция – скорость» (PV-диаграмм) продемонстрировал 1) наличие истечений вблизи МЗО S1 и S2; 2) резкое изменение лучевой скорости газа с $-7...-6$ км/с в областях МЗО S1 и S10 до $-9...-8$ км/с к юго-востоку от них. Делается вывод, что этот сдвиг может быть связан с различной плотностью молекулярного облака: более плотный газ вокруг S2 замедляет ударную волну более эффективно.

В главе 2 посвящена определению физических параметров МЗС вблизи МЗО. Методом вращательных диаграмм в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) были определены лучевые концентрации и вращательные температуры для восьми молекул (CH_3CN , OCS , SO_2 , CH_3CCH , HC_3N , H_2CS , SO , SiO) в направлении на МЗО S1, S2, S9, S10 и S39. Используя архивные наблюдательные данные в дальнем инфракрасном (ИК) диапазоне определены и построены карты лучевой концентрации водорода ($\text{H I} + \text{H}_2$) и температуры пыли в исследуемой области; определены относительные содержания молекул. Лучевая концентрация водорода меняется от $3.7 \cdot 10^{22}$ см⁻² в направлении на S2 до $1.0 \cdot 10^{22}$ см⁻² в направлении на S9 при температуре пыли 22-23 К. Наибольшие

вращательные температуры, ~ 60 К, зафиксированы для молекулы CH_3CN , наименьшие, 10-20 К – для SO и SiO . Относительные содержания молекул меняются от $2 \cdot 10^{-9}$ для H_2CS в направлении на S1 до $(1-2) \cdot 10^{-10}$ для CH_3CN и SO_2 . Анализ корреляций лучевых концентраций различных молекул позволил выделить пары молекул образующихся сходным образом (в газо-фазных реакциях либо на поверхности пыли) и пары молекул с различающимся механизмом образования. При этом в ряде случаев, при отсутствии корреляции по всему полю, наблюдается корреляция при раздельном рассмотрении северной и южной части рассматриваемой области RCW 120, что может свидетельствовать о различных физических условиях в северной и южной части туманности. С помощью программного комплекса Presta было проведено астрохимическое моделирование, позволившее выявить возможные причины формирования наблюдаемых различий. В частности, было показано, что вероятной причиной повышенного содержания метанола (CH_3OH) в южной части молекулярного облака при сравнимых содержаниях других органических молекул, таких как CH_3CN и CH_3CCH , является фотодесорбция, связанная с меньшим средним значением поглощения в данной области. В конце главы обсуждаются особенности разрушения мантий пылевых частиц и влияние этого процесса на содержания молекул.

Глава 3 посвящена применению методов машинного обучения для автоматической классификации молекулярных облаков на их различных эволюционных стадиях. Используя каталог молекулярных облаков MALT90 и базы данных мазерных источников maserDB и космической ИК-обсерватории Spitzer с помощью двух методов: обучение с учителем и без учителя, К.И. Плакитина показала, что алгоритмы кластеризации объектов, полученные методом обучения без учителя, позволил выявлять три устойчивых группы объектов, соответствующих различным эволюционным стадиям молекулярных облаков: без активного звездообразования, протозвездный и с активным звездообразованием. При этом, было показано, что разделение на эволюционные группы хорошо описываются интегральными интенсивностями пяти молекул: HCO^+ , HNC , N_2H^+ , HCN и C_2H – индикаторами эволюционной стадии молекулярного облака. Полученные эволюционные группы не очень хорошо согласуются с визуальной классификацией, проведенной по ИК-изображениям. С помощью

методов обучения без учителя (случайного леса и градиентного бустинга) удалось классифицировать 522 молекулярных облака из 774 с ранее неопределенной классификацией, причём 512 из них были отнесены к одной и той же эволюционной стадии обоими методами. Около 80% из них были отнесены к молекулярным облакам без активного звездообразования.

В **Заключении** приводятся основные результаты диссертации и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

Актуальность выполненной работы не вызывает сомнений. Области образования массивных звезд являются природными лабораториями, в которых характеристики МЗС на малых по астрономическим меркам масштабах варьируются от плотного холодного ($T \sim 10$ К) молекулярного до ионизированного высокотемпературного ($T > 10^4$ К) газа. Фундаментальный общенаучный интерес представляет то, что в этих областях образуются сложные органические молекулы – потенциальные зародыши жизни во Вселенной. Крайне перспективным направлением является и использование искусственного интеллекта – методов машинного обучения. Об актуальности данного направления говорит, в том числе, и создание Центра искусственного интеллекта, и образование в этом году факультета искусственного интеллекта в МГУ имени М.В. Ломоносова.

По теме диссертации опубликовано 3 научные статьи в журналах, рекомендованных ВАК. Основные результаты исследований были доложены на международных и всероссийских конференциях, а также научных семинарах Института астрономии РАН. Результаты работы получили признание как в научной литературе, так и на конференциях, что подтверждает **достоверность** положений и выводов диссертационной работы. Все результаты, представленные в диссертации, являются **новыми**. Применяемые в диссертации методы и подходы, полученные выводы и положения, выносимые на защиту, хорошо **обоснованы**.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. В результате проведенного астрохимического исследования молекулярного облака RCW120 построены 57 карт излучения 35 молекул, из которых 24 молекулы обнаружены в этом облаке впервые. В направлении горячего ядра RCW120 S2 зарегистрировано 95 линий, принадлежащих как

простым двухатомным, так и сложным органическим молекулам, содержащим до восьми атомов. Определены физические параметры молекулярного газа в протозвездах и направления молекулярных истечений.

2. Показано, что содержание молекул в газовой фазе в разных частях молекулярного облака в RCW120 определяется различными механизмами десорбции с поверхности пылинок. В южной части облака ледяные мантии пылинок, богатые метанолом, разрушаются фотодесорбцией и ударными волнами, что приводит к интенсивному высвобождению молекул в газ. В северной части преобладает тепловая десорбция: нагрев пылинок излучением молодой протозвезды высвобождает молекулы с их поверхности в газовую фазу.

3. Показано, что по интегральным интенсивностям линий излучения молекул HCO^+ , HCN , HNC , N_2H^+ , C_2H и H^{13}CO^+ методами машинного обучения выделяются три устойчивых кластера среди молекулярных облаков: протозвезды с признаками УФ-излучения, протозвезды без УФ-излучения и области без активного звездообразования. Разделение на кластеры не зависит от потоков в дальнем ИК-диапазоне, что свидетельствует об астрохимическом сходстве молекулярных облаков разных масс.

Теоретическая значимость работы состоит в построении самосогласованной физико-химической модели состояния МЗС в области современного звездообразования в молекулярном облаке RCW120, детектировании новых, в том числе сложных органических молекул в ней, а также в разработке схемы построения эволюционной классификации молекулярных облаков методами искусственного интеллекта, в частности, – в выявлении молекул – маркеров эволюционной классификации.

Практическая значимость работы. Разработанные и примененные в диссертационной работе методы и алгоритмы изучения физических и химических параметров МЗС в RCW120 могут быть использованы при аналогичных исследованиях других молекулярных облаков. Методика определения эволюционной классификации молекулярных облаков может быть применена к анализу больших массивов данных объектов различного типа. Описания методов определения лучевых концентраций молекул в приближении ЛТР (раздел 2.1.1), определения лучевой концентрации

водорода и температуры пыли (раздел 2.2) и машинного обучения (раздел 3.3) могут быть использованы в качестве методических пособий.

Результаты исследования могут быть использованы в ряде отечественных и зарубежных учреждениях (прежде всего – радиоастрономических), таких как АКЦ ФИАН, ИПФ РАН, САО РАН, УрФУ, Институт астрономии РАН, ГАИШ МГУ, ИКИ РАН и др.

Замечания по содержанию диссертации.

Основной блок замечаний касается интерпретации результатов классификации молекулярных облаков, полученные методами машинного обучения в главе 3. Молекулярные облака являются сложными объектами: в каких-то частях облака звездообразования не происходит, в каких-то – началось, в каких-то – активно идет, а в каких-то – уже могло закончиться. Кроме того, как отмечено в тексте диссертации, эволюция – процесс непрерывный. Поэтому разделение объектов на эволюционные классы, проведенное в диссертационной работе, требует дополнительных пояснений. В частности:

1. Отсутствует четкое определение классификационных типов (протозвезды, НШ и ФДО, без активного звездообразования). В первую очередь это касается границы разделения молекулярных облаков на протозвездные и с областями НШ. Все ли объекты, в которых присутствуют области НШ, будут отнесены методами машинного обучения к типу «НШ и ФДО»?

В таблице 9 диссертации приводятся вероятности отнесения молекулярных облаков к тому или иному эволюционному типу. Полученные результаты для ряда объектов стоило бы прокомментировать более подробно. В частности:

2. Вероятности для ряда объектов, полученные моделью случайного леса и моделью градиентного бустинга, различаются на 0.20-0.45. В чем причина подобных расхождений?

3. Многие объекты имеют вероятности 0.50-0.65, причем у всех молекулярных облаков, классифицируемых по-разному двумя методами, вероятность не превышает 0.6. По-видимому, эти объекты имеют переходный тип в рамках рассматриваемой классификационной схемы. Для уточнения эволюционной стадии данных молекулярных облаков стоило бы

рассчитать и проанализировать вероятности их отнесения к прочим эволюционным типам.

4. Из таблицы 7 на стр. 84 следует, что в облаках без звездообразования отсутствует излучение молекул C_2H и $H^{13}CO^+$, в объектах, отнесенных к областям НП, отсутствует только излучение $H^{13}CO^+$, а в облаках с протозвездами излучают обе молекулы. Возникает вопрос: не достаточно ли использование только этих молекул в качестве маркера отнесения молекулярного облака к тому или иному эволюционному типу?

5. Основным индикатором излучения НП является эмиссия в линии Na . Нигде в диссертации она не рассматривается.

6. Для линий молекул SiO и CH_3OH в направлении на источники S1 и S2, профили которых показаны на рис. 11 (стр. 33), не указан размер апертуры интегрирования.

7. Линия CH_3OH в направлении на S1 на том же рисунке показывает явное отклонение профиля от гауссова в синюю сторону. Это никак не комментируется в тексте.

8. В тексте присутствует незначительное количество помарок редакционного характера:

– на стр. 4 и 69 фраза: «применение(я) методов машинного обучения для автоматического выявления и классификации молекулярных облаков на разных стадиях эволюции» подразумевает отождествление и классификацию объектов, в диссертации речь идет о применении методов машинного обучения лишь к классифицированию молекулярных облаков, но не к их выявлению;

– на стр. 4 текста указано неверное число рисунков в диссертации (при этом в автореферате количество рисунков указано правильно);

– на рис. 1 (стр. 11) в подписи к рисунку указано три контура излучения на длине волны 870 мкм, а на самом рисунке показано только два контура;

– на стр. 42 приведены серии линий излучения семи молекул, а диаграммы приведены для восьми (пропущена молекула SiO);

– на стр. 76 в разделе 3.5.1 имеется путаница в нумерации кластеров; по-видимому, кластеры 1 и 2 – это один и тот же кластер;

– на стр. 81 указано, что «кластер, обозначенный как «Протозвезды», содержит 787 источников, из которых 501 – протозвездные объекты и области ИП», однако на верхней диаграмме рис. 31 их явно больше 501;

– на стр. 81 указано, что в кластер без активного звездообразования входит «21% объектов с неопределенной эволюционной стадией (U)», однако нижняя диаграмма рис. 31 указывает, что их меньше 20%.

Перечисленные замечания не умаляют научной ценности выполненных соискательницей исследовательских работ и носят рекомендательный характер.

Заключение ведущей организации по диссертации

Диссертация К.В. Плаkitиной представляет значительный вклад в исследование физических свойств и химического состава межзвездной среды в областях образования массивных звезд. В направлении горячего ядра S2 молекулярного облака RCW120 были получены карты излучения 35 молекул, как двухатомных, так и сложных органических, причем 24 молекулы обнаружены в этом облаке впервые. Определены особенности физических параметров молекулярного газа и направлений молекулярных истечений в различных частях облака. Было показано, что относительное содержание метанола в разных частях молекулярного облака в RCW120 определяется различными механизмами десорбции с поверхности пылинок. С помощью различных методов машинного обучения для более 2000 молекулярных облаков из каталога MALT90 была уточнена и для более 500 получена впервые классификация их эволюционной стадии. Было показано, что оптимальными маркерами для классифицирования молекулярных облаков являются интегральные интенсивности линий излучения пяти молекул: HCO^+ , HCN , HNC , N_2H^+ , C_2H и H^{13}CO^+ .

Результаты диссертации опубликованы в 3 статьях в ведущих отечественных и международных рецензируемых журналах, причем во всех публикациях соискательница является первым автором.

Автореферат диссертации правильно и адекватно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Плакитиной Каролины Владимировны «Органические молекулы в горячих ядрах молекулярных облаков» соответствует всем требованиям «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, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.1. Физика космоса, астрономия».

Отзыв принят на заседании Координационного Совета по астрофизике Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова. На заседании присутствовало 22 члена Совета из 26. Результаты голосования: «за» – 22; «против» – 0; «воздержалось» – 0. Протокол № 7 от «27» мая 2026 г.

Отзыв составил
ведущий научный сотрудник отдела Внегалактической астрономии ГАИШ МГУ, доктор физико-математических наук А.С. Гусев.

Председатель Координационного совета
по астрофизике ГАИШ МГУ
доктор физико-математических наук

А.С. Гусев

Директор ГАИШ МГУ
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН

К.А. Постнов

