УДК 524.5

ЭТИНИЛ ВОКРУГ ОБЛАСТЕЙ НІІ S255 И S257¹

© 2021 г. А. И. Буслаева^{*a*}, М. С. Кирсанова^{*a*}, *, А. Ф. Пунанова^{*b*}

^а Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия ^bУральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия *E-mail: kirsanova@inasan.ru Поступила в редакцию 05.07.2020 г. После доработки 13.01.2021 г.

Принята к публикации 29.01.2021 г.

Представлены результаты наблюдений линий излучения этинила (C_2H) в направлениях на области HII S255 и S257 и молекулярное облако между ними. Получены радиальные профили яркости линий, лучевой концентрации и обилия молекул C_2H . Показано, что в направлениях на области HII радиальный профиль обилия этинила имеет практически плоскую форму, но падает в направлении молекулярного облака, примерно в пять раз. Вместе с тем обнаружено, что обилие этинила максимально в направлении на точечные источники в молекулярном облаке — звезды с эмиссионными линиями или рентгеновским излучением. Профили линий согласуются с предположением о наличии у обеих областей HII передней и задней нейтральных стенок, которые движутся друг относительно друга.

DOI: 10.31857/S0004629921060025

1. ВВЕДЕНИЕ

На протяжении вот уже 80 лет в межзвездной среде обнаруживаются все новые и новые молекулы [1]. К настоящему времени в плотных и диффузных молекулярных облаках открыто более 200 химических соединений, не считая атомов разной степени ионизации в областях HII (см., напр., список молекул на сайте Кельнской базы данных для молекулярной спектроскопии CDMS² [2], см. также [3]). Путем последовательных присоединений отдельных атомов и радикалов в газовой фазе и на поверхностях пылинок образуются сложные органические молекулы, например метанол (СН₃ОН), этиленгликоль ((СН₂ОН)₂) и многие другие [1]. Важно, что так называемая восходящая ветвь (bottom-up) межзвездной химии требует протекания реакций на поверхности межзвездных пылинок, служащих зачастую катализатором реакций. На периферии областей HII, в фотодиссоциационных областях (ФДО), где физические и химические процессы в межзвездном веществе обусловливаются поглощением ультрафиолетового излучения с энергией меньше потенциала ионизации водорода (УФ, от 4 до 13.6 эВ), происходит обратный процесс –

разрушение длинных углеродных цепочек, так называемая нисходящая ветвь межзвездной химии (top-down [4, 5]). Важно отметить, что основные звенья – молекулы и радикалы – в восходящей и нисходящей ветвях межзвездной химии разные [1]. В то время как начальные стадии восхоляшей ветви достаточно хорошо изучены (напр., цепочка образования метанола из молекулы СО на пыли [6]), отправная точка нисходящей ветви и ее основные звенья неизвестны, кроме подтвержденного образования фуллеренов [7] как продукта фотодиссоциации полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Считается, однако, что нисходящая ветвь тесно связана с воздействием УФ-излучения на ПАУ, углеводородные пылинки и длинные углеродные цепочки, образованные в атмосферах красных гигантов [8-10].

Разрушение ПАУ под действием УФ-излучения [11, 12] может стать причиной интересных особенностей молекулярного состава газа в ФДО. Например, в работе [8] было обнаружено высокое содержание малоатомных углеводородов C_2H , $c-C_3H_2$, C_4H в направлении на освещенный край туманности Конская Голова. Ј. Рету и др. не смогли объяснить образование углеводородов при $A_V = 0.1$ с использованием модели ФДО и высказали предположение об образовании малоатомных углеводородов в результате фоторазрушения ПАУ. В более поздней работе [13] была предпринята еще одна попытка моделирования углеводоро

¹ Работа основана на наблюдениях, проведенных с помощью телескопа IRAM 30 m по проекту 027-18. IRAM поддержан INSU/CNRS (Франция), MPG (Германия) и IGN (Испания).

² https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules

родов в туманности Конская Голова с учетом пребывания газа и пыли в ФДО на стадии темного облака перед началом облучения ультрафиолетом звезды о Ориона. R. Le Gal и др. удалось объяснить распределение обилия молекул везде, кроме освещенного края Конской Головы. В работе [9] сообщается об избытке содержания ионов *l*-C₃H⁺ в направлении на освещенный край Конской Головы по сравнению с результатами астрохимического моделирования.

Интересно, что Конская Голова остается единственной ФДО, где обилие малоатомных углеводородов не было объяснено существующими астрохимическими моделями. В ФДО Барьер Ориона (Orion Bar PDR) вблизи туманности Ориона высокое обилие малоатомных углеводородов было объяснено с помощью высокотемпературных химических реакций с участием возбужденных молекул водорода [14, 15]. В работе [16] также не было обнаружено расхождений между наблюдаемыми обилиями С₂Н и результатами астрохимического моделирования в ФДО М8. В недавней теоретической работе [17] было показано, что в Барьере Ориона в результате фоторазрушения ПАУ происходит эффективное образование С₂Н из молекул ацетилена (С₂Н₂), а в Конской Голове этот процесс практически незначим по сравнению с газофазными цепочками образования С₂Н, берушими начало от ионизованного углерода С⁺. Данные экспериментов относительно эффективности образования ацетилена в результате фоторазрушения ПАУ противоречивы. H.W. Jochims и др., J. Zhen и др., С. Joblin и др. в своих работах считают, что продуктами фоторазрушения ПАУ являются атомы С, Н, а также молекулы Н₂ (см., напр., [18-20].

На снимках, полученных в инфракрасном диапазоне космическими телескопами, области HII выглядят кольцевыми туманностями – проекциями сферических оболочек либо кольцевых структур на картинную плоскость [21-23]. Несмотря на то что на сегодняшний день каталогизировано нескольких тысяч инфракрасных кольцевых туманностей, вокруг областей HII [24, 25] хорошо изученных ФДО не больше десяти. Налицо недостаток статистических данных об особенностях распределения частиц ПАУ по размерам и о содержании углеводородов в ФДО. Причем для сравнения с результатами теоретического моделирования необходимы прежде всего профили обилия молекул, построенные от источника ионизации в глубь молекулярного облака.

Цель этой работы — построить радиальный профиль обилия молекул C₂H в областях HII Sh2-255 и Sh2-257 [26] (далее S255 и S257) из комплекса S254-S258 [27]. Весь комплекс находится на расстоянии ≈1.78 кпк [28] от Солнца. Между этими областями HII зажато молекулярное облако [29, 30] (см. рис. 1). Ионизующие звезды этих областей HII LS 19 (S255) и HD 253327 (S257) имеют спектральные классы BOV [31] и B0.5V [30], соответственно. Физический размер обеих областей HII около 1.3 пк. Окрестности S255 и S257 являются областями активного звездообразования (см., напр., [27, 32–34]).

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Чтобы построить профиль обилия С₂Н в областях HII \$255 и \$257, мы провели точечные наблюдения вдоль прямых, соединяющих инфракрасный источник S255 IRS1, который находится в молекулярном облаке между областями HII $(J2000 \alpha = 06^{h}12^{m}54^{s}, \delta = 17^{\circ}59'23'')$ с ионизующими звездами каждой из областей HII: LS 19 (J2000 $\alpha = 06^{h}13^{m}04.2^{s}$, $\delta = 17^{\circ}58'41.5''$) и HD 253327 $(J2000 \alpha = 06^{h}12^{m}44.2^{s}, \delta = 17^{\circ}59'14.3'')$ (см. рис. 1). Наблюдения были проведены 19-21 августа 2018 г. на телескопе IRAM 30 m с помощью приемника EMIR 090 и спектрографа FTS 50 в режиме полной мощности. В режиме частотной модуляции мы проверили, что в OFF-позиции (J2000 α = $= 06^{h}12^{m}54.0^{s}, \delta = 18^{\circ}09'23.0'')$ отсутствует излучение интересующих нас линий.

Размер диаграммы направленности на частоте 87.4 ГГц составил 28", наблюдения проводились вдоль направлений, соединяющих S255 IRS1 и ионизующие звезды, с шагом 14". Спектральное разрешение составило 50 кГц, что на частоте 87.4 ГГц соответствует 0.17 км/с. Наблюдения проводились в удовлетворительных погодных условиях, количество осаждаемого водяного пара pwv = 7–13 мм. Шумовая температура системы была на уровне 100 К. Шкала интенсивности была переведена в единицы температуры основного лепестка диаграммы направленности (T_{mb}) с учетом эффективности антенны $F_{eff} = 0.95$, $B_{eff} = 0.81^3$. Время накопления сигнала в каждой точке было 7.7 мин, что позволило достичь чувствительности 0.05 К в единицах T_{mb} .

Обработка и анализ спектров (учет эффективности антенны, вычитание базовой линии, аппроксимация профилей функцией Гаусса) были проведены с помощью пакета CLASS/GILDAS⁴.

3. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Чтобы определить обилие C_2H , мы использовали данные о лучевой концентрации вещества, выраженной в числе молекул водорода на луче

³ http://www.iram.es/IRAMES/mainWiki/Iram30mEfficiencies ⁴ Continuum and Line Analysis Single-Dish Software

http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS



Рис. 1. Оптическое изображение областей HII S255 и S257 из обзора DSS, фильтр POSS2 Red. Позиции, в которых проводились наблюдения, показаны пустыми кружками, размер которых соответствует диаграмме направленности телескопа на частоте 87 ГГц (28"). Ионизующие звезды областей HII показаны красными символами. Белыми символами показаны ИК-источники S255 IRS1 и S255 IRS3.

зрения ($N_{\rm H_2}$) и температуре пыли ($T_{\rm dust}$), полученные в результате обработки данных с телескопа *Herschel* в проекте Hi-GAL [35]. Алгоритм обработки представлен в работе [36] и применен к объектам из обзора Hi-GAL в работе [37], сами данные взяты из открытых источников⁵. Угловое разрешение файлов с пространственным распределением $N_{\rm H_2}$ и $T_{\rm dust}$ составило 12″.

4. АНАЛИЗ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Перед тем как определять лучевую концентрацию этинила, мы убедились, что соотношение между яркостными температурами сверхтонких компонентов соответствует оптическитонкому излучению. Для этого мы проверили отношение наиболее ярких компонент на частотах 87328.624 МГц к 87316.925 МГц и убедились, что в наблюдаемых позициях оно лежит в пределах 0.48-0.52, что близко к теоретическому 0.50. Анализ отношения интенсивностей между линиями мультиплета с помощью процедуры hfs (она предполагает равенство ширин всех линий в мультиплете) в пакете CLASS показал, что процедура аппроксимации не сходится. Вероятно, это происходит из-за несимметричных профилей линий (см. ниже).

Для определения лучевой концентрации молекулы $C_2H(N_{C_2H}, [cm^{-2}])$ мы использовали предположение об ЛТР и условие оптически-тонкого излучения в линиях, при которых справедливо выражение (1). Кроме того, мы использовали условие Релея—Джинса $hv \ll kT$, которое удовлетворяется при наблюдениях молекулярных облаков на 3 мм. Температура фонового излучения ($T_{bg} = 2.73$ K) не учитывалась, так как ее значение пренебрежимо мало. Таким образом, лучевая концентрация определяется по следующей формуле:

$$N_{\rm C_2H} = \frac{8\pi v_{\rm ul}^2 k}{A_{\rm ul} h c^3} \frac{Q}{g_u} \frac{1}{f} \exp\left(\frac{E_u}{k T_{\rm ex}}\right) W_{\rm C_2H},\tag{1}$$

где v_{ul} – средневзвешенная частота перехода $u \rightarrow l$, [Гц], которая рассчитывается с учетом силы линии каждой сверхтонкой компоненты, (см. табл. 1); A_{ul} – коэффициент Эйнштейна для спонтанного излучения, [1/c]; g_u – статистический вес уровня; Q – статистическая сумма; E_u – энергия верхнего уровня, [эрг]; k – постоянная Больцмана, [эрг/K]; \hbar – постоянная Планка, [эрг c]; c – скорость света, [см/c]; T_{ex} – температура возбуждения верхнего уровня данного перехода, [K]; W_{C_2H} – интегральная интенсивность спектральной линии, [К см/c]; f – коэффициент заполнения диаграммы направленности телескопа.

⁵ http://www.astro.cardiff.ac.uk/research/ViaLactea/

Переход	Частота, МГц	$E_{\rm u/k}$, K	$g_{ m u}$	$S_{ m ul}$
$1_{3/2,1} - 0_{1/2,1}$	87284.156	4.2	3	0.17
$1_{3/2,2} - 0_{1/2,1}$	87316.925	4.2	5	1.66
$1_{3/2,1} - 0_{1/2,0}$	87328.624	4.2	3	0.83
$1_{1/2,1} - 0_{1/2,1}$	87402.004	4.2	3	0.83
$1_{1/2,0} - 0_{1/2,1}$	87407.165	4.2	1	0.33
$1_{1/2,1} - 0_{1/2,0}$	87446.512	4.2	3	0.17

Таблица 1. Параметры сверхтонких компонент перехода 1 \rightarrow 0 молекулы C₂H в соответствии с CDMS

Коэффициент Эйнштейна *A*_{ul} для всего перехода в общем виде определяется по формуле (2):

$$A_{\rm ul} = \frac{64\pi^4}{3hc^3} v_{\rm ul}^3 \frac{S_{\rm ul}}{g_{\rm u}} \mu^2, \qquad (2)$$

где $S_{\rm ul} = 1 -$ сила перехода в нашем случае, так как мы ведем расчет лучевой концентрации по интегральной интенсивности всего мультиплета; $\mu = 7.7 \times 10^{-19}$ ед. СГС [или 0.77 Дебай] – дипольный момент молекулы.

После подстановки формулы (2) в (1) выражение для расчёта лучевой концентрации N_{C_2H} примет следующий вид:

$$N_{\rm C_2H} = \frac{3k}{8\pi^3 v_{\rm ul} \mu^2} \frac{Q}{f} \exp\left(\frac{E_{\rm u}}{kT_{\rm ex}}\right) W_{\rm C_2H}.$$
 (3)

Все параметры формулы (3), за исключением произведения $Q \exp(E_u/kT_{ex})) W_{C_2H}$, определяются только типом перехода и строением молекулы.

 W_{C_2H} определяется из наблюдений, а величина *Q* зависит от температуры возбуждения T_{ex} . Для каждой наблюдавшейся позиции мы рассчитали *Q* исходя из принятого значения T_{ex} по формуле для линейных молекул:

$$Q = \frac{k T_{\rm ex}}{h B_0} + \frac{1}{3},$$
 (4)

где $B_0 = 43674.534 \times 10^6 1/c$ — вращательная постоянная молекулы, [1/c].

В качестве температуры возбуждения $T_{\rm ex}$ мы взяли температуру пыли $T_{\rm dust}$. Для этого на карте распределения температуры пыли были выбраны области диаметром 28", центры которых соответствуют позициям, в которых проводились наблюдения (см. рис. 1), и проведено усреднение температуры пыли по размеру позиции. В качестве ошибок определения $T_{\rm ex}$ (и $N_{\rm H_2}$, см. ниже) мы использовали среднеквадратичные отклонения от среднего значения. О возможном несоответствии температуры пыли и температуры возбуждения перехода C2H(1-0) мы рассуждаем ниже. Обилие молекул (x_{C_2H}) определялось относительно лучевой концентрации ядер водорода на луче зрения по формуле (5):

$$x_{\rm C_2H} = \frac{N_{\rm C_2H}}{2N_{\rm H_2}}.$$
 (5)

Значения интегральной интенсивности W_{C_2H} были определены как интеграл яркостной температуры $T_{\rm mb}$ по скорости в ходе анализа спектров излучения молекулы с помощью программы CLASS. Описание полученных результатов приведено в следующем разделе.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам наблюдений в двадцати исследуемых позициях, на спектрах задетектированы шесть сверхтонких компонент перехода $1 \rightarrow 0$ этинила. Спектр всей сверхтонкой структуры в позиции 10 показан на рис. 2, а четыре наиболее ярких сверхтонких компонента во всех позициях на рис. 3. Наиболее яркие линии обнаружены в позициях 8-12, в направлении на молекулярное облако. В направлении на ионизующую звезду LS 19 в S255 сверхтонкие компоненты на частотах v = 87284.156 МГц и v = 87446.512 МГц определяются слабо (позиция 1), в направлении на HD 253327 (позиция 18) видны лишь наиболее яркие компоненты сверхтонкой структуры. Параметры линий излучения этинила приведены в табл. 2. Профили линий асимметричны, отличаются от Гауссовых большей интенсивностью с красной стороны (см., напр., спектры в позициях 2-4 и 13 вблизи направлений на ионизующие звезды), наблюдаются и плоские профили линий (например, позиции 3 и 14). Формы профилей сверхтонких компонент могут быть разными в одной и той же позиции. В центральных позициях 8-12 профили линий симметричные. Ширина линий в направлениях вблизи ионизующих звезд ($\Delta v = 3.5 \pm$ ± 0.17 км/с в позиции 1: $\Delta v = 5.12 \pm 0.71$ км/с в позиции 18) в 1.5–2 раза выше, чем ширина линий в направлении на молекулярное облако $(\Delta v = 2.37 \pm 0.17 \text{ км/с в позиции 10}).$ Видно, что пик линии в направлении на молекулярное облако (v = 7.31 км/с) приходится на провал между пиками в направлениях на ионизующие звезды (например в позициях 2, 3, 5, 14, 17 и 18, пики на скоростях ≈5.5 и 8.2 км/с). Расстояние между пиками в позициях, где профили двухпиковые, равно примерно 1–1.5 км/с. Отметим, что такая разница в скоростях соответствует характерной скорости расширения сферически-симметричных областей HII (см., напр., [39, 40]). Все это указывает на присутствие нескольких кинематических компонент на луче зрения вблизи ионизующих звезд. По-видимому, это передняя и задняя моле-

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 98 № 6 2021



Рис. 2. Спектр излучения молекулы C₂H при переходе 1 → 0 в шкале температуры основного лепестка для позиции 10.

кулярные стенки областей HII, которые вносят вклад в образование бленды близких по скорости компонентов. Примеры диаграмм "позиция скорость" для расширяющихся оболочек вокруг комплексов звездообразования с несколькими областями HII могут быть найдены в работах [41, 42]. Несмотря на количественную разницу между характерными скоростями расширения комплексов звездообразования и областями HII вокруг одиночных звезд, качественная картина одинакова, см. также [43].

Как было отмечено выше, в качестве T_{ex} взято значение T_{dust} в исследованных позициях. Значения *T*_{ех} приведены в табл. 3 и показаны на рис. 4а. Видно, что температура возбуждения достигает максимального значения $T_{\rm ex} = (28.6 \pm 2.7)$ К в центральной позиции 10 (направление на S255 IRS 1 в молекулярном облаке) и уменьшается максимально примерно на 5 К в направлениях на ионизующие звезды. Величина $N_{\rm H_2}$ имеет максимум в направлении на S255 IRS 1 (см. табл. 3). Радиальные профили $T_{\rm ex}$ и $N_{\rm H_2}$ показаны на верхних панелях рис. 4. Они имеют похожий вид с максимумом в позиции 10 и плавным уменьшением в стороны обеих ионизующих звезд. То, что $N_{\rm H_2}$ не уменьшается до нуля в позициях 1 и 18, говорит о наличии нейтрального газа в направлениях на ионизующие звезды, что согласуется с выводами о передней и задней стенках областей HII, сделанными выше.

Значения лучевой концентрации и обилие этинила приведены в табл. 3 и показаны на нижних панелях на рис. 4. Радиальный профиль N_{C_2H} имеет такую же форму, как и N_{H_2} . Максимум лучевой концентрации молекул C_2H достигается в позиции 10 и составляет $N_{C_2H} = (11.78 \pm 0.91) \times 10^{14}$ см⁻². При движении в обе стороны к позициям 1 и 18 лучевая концентрация этинила уменьшается на порядок величины в S255 и в 25 раз в S257.

Определив величину N_{C,H} в предположении об ЛТР, мы оценили, насколько близки ЛТР и не-ЛТР оценки. Для этого мы использовали пакет RADEX, который позволяет оценивать яркость линий излучения в не-ЛТР модели при заданных параметрах среды: температуры, плотности и лучевой концентрации молекул [44]. Для проведения этой оценки мы взяли значения температуры пыли в качестве кинетической температуры, наблюдаемые ширины линий и полученные в ЛТР-анализе значения $N_{C_{2}H}$. Поскольку информации о пространственном распределении плотности газа в молекулярном облаке у нас нет, мы проверили яркости теоретических спектров для нескольких значений плотности: 10², 10³ и 10⁴ см⁻³. Для центральных позиций в направлении на молекулярное облако мы получили согласие наблюдаемых яркостей с ЛТР-моделью в пределах 10% от наблюдаемых интенсивностей для плотности 10⁴ см⁻³, это значение плотности является разумным и реализуемым в молекулярных облаках. Для точек в направлениях на ионизующие звезды, теоретические не-ЛТР значения яркости линий этинила значительно (до порядка величины) меньше, чем наблюдаемые при плотностях от $10^2 - 10^3$ см⁻³ (разумные значения плотности при движении в сторону звезды от молекулярного облака), также как и температура возбуждения излучения этинила меньше кинетической температуры в расчете RADEX. Чтобы при этих плотностях получить наблюдаемые яркости линий, нам необходимо увеличить величину $N_{\rm C,H}$ на порядок величины. Впрочем, при не-ЛТР расчете с плотностью 10⁴ см⁻³, яркости сверхтонких компонент воспроизводятся с точностью до 10%, что также может говорить о наличии плотных передней и



Рис. 3. Спектры излучения молекулы C_2H в четырех наиболее ярких компонентах сверхтонкой структуры перехода $1 \rightarrow 0$ в шкале температуры основного лепестка. Цифрами показаны позиции, соответствующие рис. 1.

Таблица 2. Параметры мультиплета C₂H(1–0)

Пози- ция	<i>v</i> *, км/с	Δv^* , км/с	T _{peak} , K	<i>W</i> _{C₂H} , (К · км)/с
1	7.59 ± 0.17	3.43 ± 0.17	0.33 ± 0.02	2.98 ± 0.36
2	8.24 ± 0.17	3.08 ± 0.17	0.36 ± 0.03	3.45 ± 0.39
3	8.24 ± 0.17	2.90 ± 0.17	0.42 ± 0.03	3.32 ± 0.38
4	8.06 ± 0.17	2.63 ± 0.17	0.50 ± 0.03	3.47 ± 0.33
5	7.59 ± 0.17	3.07 ± 0.17	0.62 ± 0.04	4.89 ± 0.50
6	7.28 ± 0.17	2.73 ± 0.17	0.81 ± 0.04	5.68 ± 0.51
7	7.30 ± 0.17	2.09 ± 0.74	1.49 ± 0.03	8.18 ± 0.65
8	7.47 ± 0.17	2.12 ± 0.17	2.63 ± 0.06	15.09 ± 1.16
9	7.45 ± 0.17	2.19 ± 0.17	3.29 ± 0.06	19.80 ± 0.99
10	7.31 ± 0.17	2.37 ± 0.17	3.66 ± 0.11	24.46 ± 1.85
11	7.32 ± 0.17	2.33 ± 0.17	3.86 ± 0.08	25.23 ± 1.81
12	7.46 ± 0.17	2.41 ± 0.17	2.45 ± 0.07	16.95 ± 1.26
13	7.55 ± 0.17	3.02 ± 0.17	0.77 ± 0.04	6.09 ± 0.52
14	7.21 ± 0.17	3.47 ± 0.17	0.33 ± 0.02	2.82 ± 0.37
15	7.25 ± 0.17	3.33 ± 0.19	0.21 ± 0.02	2.16 ± 0.32
16	7.14 ± 0.17	3.77 ± 0.34	0.16 ± 0.01	1.49 ± 0.43
17	6.52 ± 0.23	4.27 ± 0.58	0.10 ± 0.01	1.43 ± 0.43
18	6.50 ± 0.29	5.12 ± 0.71	0.07 ± 0.01	1.02 ± 0.30
19	6.57 ± 0.50	4.12 ± 1.01	0.06 ± 0.01	0.24 ± 0.25
20	5.93 ± 0.31	4.11 ± 0.72	0.06 ± 0.02	0.44 ± 0.22

Примечание. Параметры, отмеченные звездочкой (*), определены с помощью метода *hfs*, который считает их эквивалентными одной Гауссовой кривой с разным уровнем относительной интенсивности. Интенсивность пика T_{peak} определена для наиболее яркой компоненты на частоте v = 87316.925 МГц с помощью метода *gauss*. Интегральная интенсивность определена для всех компонентов мультиплета.

задней молекулярных стенок областей HII. Температуры возбуждения, полученные в не-ЛТР расчете, составляют 4–6 К, это значит, что возбуждение линий этинила происходит в субтепловом режиме. Благодаря тому, что зависимость лучевой концентрации от температуры возбуждения на 3 мм слабая, меняя $T_{\rm ex}$ в пределах от 4–6 до 25 К, мы получаем разницу результатов в пределах фактора 3. Для того, чтобы сузить диапазон переметров не-ЛТР моделирования, необходимо провести дополнительные наблюдения линий этинила в других переходах.

Рассматривая полученную зависимость обилия этинила, можно отметить следующие особенности: значения обилия в позициях 1–8 (в направлении на звезду LS 19 в S255) и 13–18 (в направлении на звезду HD 253327 в S257) имеют тенденцию к увеличению в сравнении с позициями 9–12 в молекулярном облаке. Так, в направлении на молекулярное облако в позиции 10 обилие составило $x_{C_2H} = (5.83 \pm 5.07) \times 10^{-9}$, а в направлениях на ионизующие звезды (позиции 1 и 18) $x_{C_2H} = (13.91 \pm 2.47) \times 10^{-9}$ и $x_{C_2H} = (9.60 \pm 2.83) \times 10^{-9}$

× 10⁻⁹ соответственно. Большая ошибка определения обилия этинила в направлении на молекулярное облако (например, в позиции 11 $x_{C,H}$ = = $(10.18 \pm 13.81) \times 10^{-9}$) связана с тем, что в позиции, по которым происходит усреднение величины $N_{\rm H_2}$, попадает несколько ярких пятен на карте распределения $N_{\rm H_2}$. По этой причине среднеквадратичное отклонение в позициях 8–11 выше, чем в других позициях. Тем не менее в направлении на молекулярное облако четко видно уменьшение обилия этинила примерно в 2 раза по сравнению с достаточно плоскими участками радиального профиля в направлении областей НІІ. Плоская форма участка профиля обилия говорит в пользу того, что области НІІ окружены квазисферическими молекулярными оболочками, в которых этинил распределен практически равномерно.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Для эффективного образования этинила необходимо, чтобы в межзвездном газе содержались ион C^+ и молекулярный водород H_2 (см. [45–47]), эти условия выполняются в ФДО. В молекулярном облаке углерод содержится преимущественно в составе молекул СО из-за ослабления поля излучения звезды пылью и экранирования молекулами Н₂. Поэтому уменьшение обилия этинила в молекулярном облаке в позициях 7-13 легко объяснимо конвертацией углерода в СО. Примерно одинаковое обилие этинила в направлениях на области HII указывает на то, что их химическая эволюция протекает сходным образом. Это неудивительно, ведь эти области НІІ ионизуются звездами практически одинакового спектрального класса и имеют одинаковый размер. Увеличение обилия этинила в 1.5-2 раза в позициях 12 и 13 не превосходит разброса в пределах ошибок определения величины. Отметим, что на оптическом (рис. 1) и ИК-изображениях 2MASS в направлениях на позиции 12-13 видны точечные источники. В частности, в область, которая соответствует позиции 12, попадает звезда с эмиссионными линиями S255 1, где наблюдается излучение в линии Нα [48] (яркие точки видны на рис. 1 в позициях 12 и 13) и объект Хербига-Аро S235 H₂ 1 [49]. Рядом расположен рентгеновский источник СХО J061250.6+175909 — молодая звезда малой массы в скоплении S255-IR [50]. Вполне возможно, что ионизующее излучение в окрестности этих точечных источников приводит к локальному росту обилия этинила за счет ионизации углеродосодержащих молекул с высвобождением

иона C^+ , который принимает участие в химических цепочках образования этинила. Радиальный профиль обилия этинила не содержит каких-либо особенностей в направлениях на фронт ионизации (позиции 6 и 16 для S255 и S257 соответ-

Позиция	Q	$T_{\rm ex}$, K	$N_{\rm H_2}, 10^{20}~{ m cm}^{-2}$	$N_{\rm C_2H}, 10^{14} {\rm cm}^{-2}$	$x_{\rm C_2H}, 10^{-9}$
1	45.6	25.3 ± 0.3	47.6 ± 6.2	1.33 ± 0.16	13.91 ± 2.47
2	45.6	25.3 ± 0.2	55.3 ± 3.6	1.53 ± 0.17	13.87 ± 1.81
3	45.2	25.0 ± 0.2	56.1 ± 7.6	1.47 ± 0.17	13.06 ± 2.32
4	44.9	24.8 ± 0.1	56.7 ± 17.4	1.52 ± 0.14	13.43 ± 4.32
5	44.9	24.8 ± 0.2	72.9 ± 31.2	2.15 ± 0.22	14.72 ± 6.48
6	45.1	24.9 ± 0.2	93.5 ± 44.7	2.50 ± 0.22	13.37 ± 6.50
7	45.1	24.9 ± 0.7	162.2 ± 71.2	3.60 ± 0.29	11.10 ± 4.95
8	43.7	23.9 ± 1.3	436.6 ± 365.2	6.48 ± 0.50	7.42 ± 6.23
9	46.1	25.7 ± 3.5	780.9 ± 483.2	8.89 ± 0.49	5.69 ± 3.54
10	50.4	28.6 ± 2.7	1011.0 ± 877.0	11.78 ± 0.91	5.83 ± 5.07
11	46.5	25.9 ± 2.1	559.3 ± 758.1	11.38 ± 0.83	10.18 ± 13.81
12	45.5	25.2 ± 0.6	159.9 ± 65.1	7.52 ± 0.56	23.50 ± 9.73
13	45.9	25.5 ± 0.4	75.7 ± 27.7	2.72 ± 0.23	17.97 ± 6.75
14	45.9	25.5 ± 0.6	48.5 ± 10.5	1.26 ± 0.17	12.99 ± 3.29
15	45.4	25.1 ± 0.4	38.0 ± 6.0	0.96 ± 0.14	12.57 ± 2.72
16	44.6	24.6 ± 0.2	30.6 ± 2.4	0.65 ± 0.19	10.64 ± 3.18
17	43.8	24.1 ± 0.4	25.5 ± 3.0	0.62 ± 0.19	12.10 ± 3.91
18	43.5	23.8 ± 0.2	22.8 ± 0.6	0.44 ± 0.13	9.60 ± 2.83
19	43.5	23.8 ± 0.3	24.0 ± 1.4	0.10 ± 0.11	2.12 ± 2.23
20	42.9	23.4 ± 0.5	26.6 ± 1.7	0.19 ± 0.09	3.53 ± 1.77

Таблица 3. Результаты расчета лучевой концентрации и обилия этинила

ственно). Позициям с температурой пыли 23–25 К соответствует УФ-поле с G_0P –100 в единицах поля Хабинга (см., напр., [51]). Значение G_0 в S255–S257 близко к тому, что найдено в ФДО близ Конской Головы, поэтому необходимо провести дополнительные наблюдения других линий излучения этинила для построения точных радиальных профилей обилия этой молекулы и сравнения обилий этинила на ионизованном крае ФДО Конская Голова и в окрестностях фронта ионизации S255–S257.

В работе [34] приведены данные наблюдений $C_2H(4-3)$ в направлении S255 IRS1 (центральная позиция 10 в настоящей работе) на ALMA и получены оценки лучевой концентрации этинила. Несмотря на разность масштабов, оценки согласуются в пределах фактора 5 (наша оценка меньше), что свидетельствует о том, что этинил содержится в плотном молекулярном облаке.

Сравнение лучевых концентраций этинила в окрестности S255-S257 со значениями, найденными в других ФДО, показало, что значения N_{C_2H} в направлениях на области НІІ сходны с теми, что были найдены в Конской голове, IC 63 [52] и М 8 [16]. По мере приближения к пику лучевой концентрации газа в молекулярном облаке, N_{C_2H} приближается к значениям, наблюдаемым в ФДО Барьер Ориона [15] и некоторых молекулярных облаках (напр., [53, 54]), а максимальные наблюдаемые значения N_{C_2H} в позициях 10 и 11 сравни-

мы с ФДО и молекулярным облаком ОМС-1 [55] (см. также рис. 10 в работе [54]). Обилие этинила на радиальном профиле сходно со значением, наблюдаемым в Барьере Ориона: по оценкам из работы [15] обилие в интервале (0.7–2.7)×10⁻⁹ в

объекте с полем излучения $G_0 \sim 10^4$ может быть объяснено с помощью высокотемпературных химических реакций с возбужденным молекулярным водородом. Таким образом, ФДО в S255– S257 представляет интерес для астрохимического моделирования, ведь в нем сравнимое обилие этинила наблюдается при меньших на два порядка величины значениях G_0 .

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение проведенной работы мы делаем следующие выводы:

1. Мы провели наблюдения молекулы C_2H в областях HII S255 и S257 в двадцати позициях вдоль прямых, соединяющих ИК-источник S255 IRS 1, находящийся в молекулярном облаке, с ионизующими звездами каждой из областей: LS 19 и HD 253327.

2. Наиболее яркое излучение этинила наблюдается в направлении на молекулярное облако (яркостная температура ≈4 К), наиболее слабое – в направлениях на ионизующие звезды (<0.5 К). Наибольшую ширину имеют линии в направлениях на ионизующие звезды (≈3–5 км/с), наи-



Рис. 4. Профили физических параметров: температура пыли T_{ex} (а), лучевая концентрация N_{H_2} (б), лучевая концентрация этинила (в) и обилие этинила (г).

меньшую — в направлении на молекулярное облако между областями HII (≈2 км/с). Форма профилей линий указывает на то, что в молекулярной оболочке присутствует несколько кинематических компонентов, которые разделяются на луче зрения по мере приближения к ионизующим звездам. Такими компонентами могут быть передняя и задняя стенки областей HII.

3. В двадцати исследуемых позициях мы определили лучевые концентрации и обилие этинила. Максимальное значение лучевой концентрации $\approx 12 \times 10^{14}$ см⁻² получено в направлении на центр молекулярного облака, оно уменьшается в обе стороны к ионизующим звездам. Значения обилия, напротив, минимальны в направлении на молекулярное облако (6 × 10⁻⁹), а в направления на ионизующие звезды обилие больше примерно в два раза. Показано, что обилие этинила максимально и достигает 2×10^{-8} в направлении на то-

мально и достигает 2×10^{-5} в направлении на точечные источники в молекулярном облаке — звезды с эмиссионными линиями либо рентгеновским излучением.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы выражаем благодарность Л.Е. Пирогову, С.В. Каленскому, Я.Н. Павлюченкову за ценные советы в ходе работы с данными наблюдений, Д.А. Семенову за обсуждение химии этинила, а также анонимному рецензенту за ценные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа поддержана грантом РФФИ 20-02-00643 А.

Анна Пунанова — член партнерской группы общества Макса Планка в Уральском федеральном университете. Анна Пунанова благодарит поддержку Министерства науки и высшего образования России по проекту госзадания FEUZ-2020-0038.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. A. G. G. M. Tielens, Rev. Modern Physics 85(3), 1021 (2013).
- 2. C. P. Endres, S. Schlemmer, P. Schilke, J. Stutzki, and H. S. P. Müller, J. Molecular Spectroscopy **327**, 95 (2016).
- B. A. McGuire, Amer. Astronomical Society 239(2), 17 (2018).

- 4. *O. Berné and A. G. G. M. Tielens*, Proc. the National Academy of Sciences of the USA **109**, 401 (2012).
- O. Berné, J. Montillaud, and C. Joblin, Astron. and Astrophys. 577, id. A133 (2015).
- A. G. G. M. Tielens and W. Hagen, Astron. and Astrophys. 114(2), 245 (1982).
- J. Zhen, P. Castellanos, D. M. Paardekooper, H. Linnartz, and A. G. G. M. Tielens, Astrophys. J. 797, id. L30 (2014).
- J. Pety, D. Teyssier, D. Fosse, M. Gerin, E. Roueff, A. Abergel, E. Habart, and J. Cernicharo, Astron. and Astrophys. 435, 885 (2005).
- 9. V. V. Guzman, J. Pety, J. R. Goicoechea, M. Gerin, E. Roueff, P. Gratier, and K. I. Oberg, Astrophys. J. 800, id. 33 (23015).
- 10. E. F. van Dishoeck, in Astrochemistry VII: Through the Cosmos from Galaxies to Planets, Proc. of the IAU, IAU Symp. **332**, 3 (2018).
- 11. Ya. N. Pavlyuchenkov, M. S. Kirsanova, and D. S. Wiebe, Astron. Rep. 57(8), 573 (2013).
- 12. M. S. Murga, D. S. Wiebe, E. E. Sivkova, and V. V. Akimkin, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **488**, 965 (2019).
- R. Le Gal, E. Herbst, G. Dufour, P. Gratier, M. Ruaud, T. H. G. Vidal, and V. Wakelam, Astron. and Astrophys. 605, 88 (2017).
- 14. M. Agúndez, J. R. Goicoechea, J. Cernicharo, A. Faure, and E. Roueff, Astrophys. J. 713, 662 (2010).
- 15. S. Cuadrado, J. R. Goicoechea, P. Pilleri, J. Cernicharo, A. Fuente, and C. Joblin, Astron. and Astrophys. **575**, id. 82 (2015).
- M. Tiwari, K. M. Menten, F. Wyrowski, J. P. Perez-Beaupuits, M.-Y. Lee, and W.-J. Kim, Astron. and Astrophys. 626, id. 28 (2019).
- M. S. Murga, M. S. Kirsanova, A. I. Vasyunin, and Ya. N. Pavlyuchenko, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 497(2), 2327 (2020).
- 18. H. W. Jochims, E. Ruhl, H. Baumgartel, S. Tobita, and S. Leach, Astrophys. J. **420**, 307 (1994).
- J. Zhen, P. Castellanos, D. M. Paardekooper, N. Ligterink, H. Linnartz, L. Nahon, C. Joblin, and A. G. G. M. Tielens, Astrophys. J. 804, id. L7 (2015).
- 20. C. Joblin, G. Wenzel, and S. Rodriguez Castillo, A. Simon, et al., arXiv:1912.03137 [astro-ph.GA] (2019).
- 21. L. Deharveng, A. Zavagno, and J. Caplan, Astron. and Astrophys. 433, 565 (2005).
- L. Deharveng, F. Schuller, L. D. Anderson, and A. Zavagno, Astron. and Astrophys. 523, id. A6 (2010).
- Т. А. Лозинская, Взрывы звезд и звездный ветер в галактиках (M.: URSS, 2013).
- E. Churchwell, M. S. Povich, D. Allen, and M. G. Taylor, Astrophys. J. 649, 759 (2006).
- 25. R. J. Simpson, M. S. Povich, S. Kendrew, C. J. Lintott, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **424**, 2442 (2012).
- 26. S. Sharpless, Astrophys. J. Suppl. 4, 257 (1959).
- 27. L. A. Chavarria, L. E. Allen, J. L. Hora, C. M. Brunt, and G. G. Fazio, Astrophys. J. 682, 445 (2008).
- 28. D. Russeil, C. Adami, and Y. M. Georgelin, Astron. and Astrophys. 470, 161 (2007).
- 29. J. H. Bieging, W. L. Peters, B. Vila Vilaro, K. Schlottman, and C. Kulesa, Astron. J. 138, 975 (2009).
- 30. D. K. Ojha, M. R. Samal, A. K. Pandey, B. C. Bhatt, et al., Astrophys. J. **738**, id. 156 (2011).

- 31. A. F. J. Moffat, M. P. Fitzgerald, and P. D. Jackson, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 38, 197 (1979).
- I. Zinchenko, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, S. Kurtz, D. K. Ojha, M. R. Samal, and S. K. Ghosh, Astrophys. J. 455, id. 177 (2012).
- 33. L. Chavarria, L. Allen, C. Brunt, J. L. Hora, A. Muench, and G. Fazio, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 439, 3719 (2014).
- 34. I. I. Zinchenko, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, K.-S. Wang, and Y. Wang, Astrophys. J. 889, id. 43 (2020).
- 35. S. Molinari, B. Swinyard, J. Bally, and M. Barlow, Astron. and Astrophys. **518**, id. L100 (2010).
- 36. *K. A. Marsh, A. P. Whitworth, and O. Lomax*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **454**, 4282 (2015).
- 37. K. A. Marsh, A. P. Whitworth, O. Lomax, S. E. Ragan, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **471**, 2730 (2017).
- J. G. Mangum and Y.L. Shirley, Publ. Astron. Soc. Pacif. 127, 266 (2015).
- 39. *M. S. Kirsanova, D. S. Wiebe, and A. M. Sobolev*, Astron. Rep. **53**, 611 (2009).
- 40. M. S. Kirsanova, Ya. N. Pavlyuchenkov, D. S. Wiebe, P. A. Boley, S. V. Salii, S. V. Kalenskii, A. M. Sobolev, and L. D. Anderson, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 488, 5641 (2019).
- 41. T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, and N. Yu. Podorvanyuk, Astron. Letters 29, 77 (2003).
- N. R. Pokhrel, C. E. Simpson, and I. Bagetakos, Astron. J. 160,(2), id. 66 (2020), arXiv:2006.01735 [astroph.GA].
- 43. M. S. Kirsanova, V. Ossenkopf-Okada, L. D. Anderson, P. A. Boley, J. H. Bieging, Y. N. Pavlyuchenkov, M. Luisi, N. Schneider, M. Andersen, M. R. Samal, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 497, 2651 (2020).
- 44. F. F. S. van der Tak, J. H. Black, F. L. Schoier, D. J. Jansen, and E. F. van Dishoeck, Astron. and Astrophys. 468, 627 (2007).
- 45. A. Dalgarno and J. H. Black, Rep. Prog. Phys. **39**(6), 573 (1976).
- 46. A. Sternberg and A. Dalgarno, Astrophys. J. Suppl. 99, 565 (1995).
- 47. N. Sakai and S. Yamamoto, Chem. Rev. 113(12), 8981 (2013).
- 48. C. Alvarez and M. G. Hoare, Astron. and Astrophys. 440, 569 (2005).
- M. P. Miralles, L. Salas, I. Cruz-González, and S. Kurtz, Astrophys. J. 488, 749 (1997).
- 50. P. Mucciarelli, T. Preibisch, and H. Zinnecker, Astron. and Astrophys. 533, id. A121 (2011).
- M. S. Kirsanova, P. A. Boley, A. V. Moiseev, D. S. Wiebe, R. I. Uklein, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 497, 1050 (2020), arXiv:1911.04551 [astro-ph.GA].
- 52. D. Teyssier, D. Fosse, M. Gerin, J. Pety, A. Abergel, and E. Roueff, Astron. and Astrophys. **417**, 135 (2004).
- L. E. Pirogov, V. M. Shul'ga, I. I. Zinchenko, P. M. Zemlyanukha, A. N. Patoka, and M. Tomasson, Astron. Rep. 60, 904 (2016).
- 54. M. Bouvier, A. Lopez-Sepulcre, C. Ceccarelli, C. Kahane, M. Imai, N. Sakai, S. Yamamoto, and P. J. Dagdigian, Astron. and Astrophys. **636**, id. A19 (2020).
- H. Ungerechts, E. A. Bergin, P. F. Goldsmith, W. M. Irvine, F. P. Schloerb, and R. L. Snell, Astrophys. J. 482, 245 (1997).