

Структура молекулярного облака ТМС-1 в линии HCN $J = 1 - 0$

В.М.Шульга*, З.В.Мышенко*, Е.А.Назаров*, А.В.Антюфеев*,
Л.Б.Князьков*, Л.Н.Литвиненко* Н.И.Зинченко**,
А.В.Лапинов**, Л.Е.Пирогов**

*Радиоастрономический институт Национальной Академии наук Украины,
Украина, 310002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4**

*Институт прикладной физики Российской Академии наук,
Россия, 603600, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46***

Статья поступила в редакцию 11 сентября 1995 г.

Представлены результаты спектральных наблюдений темного молекулярного облака ТМС-1 в линии молекулы HCN ($J = 1 - 0$). На площади $15' \times 5'$ выделено пять конденсаций. Они совпадают в пределах ошибок с аналогичными образованиями, выделенными ранее по линии молекулы NH_3 . Параметры линий HCN в конденсациях (скорость, ширина, интенсивность) значительно отличаются друг от друга. На всей поверхности объекта наблюдается аномальное излучение сверхтонких компонент данной линии. Исследовалось распределение отношений интенсивности компонент по картинной плоскости облака. Наибольшее отклонение от 1.1Е зафиксировано в области, связанной с цианополиновым пиком, вблизи которого $R_{02} = T_A(F = 0 - 1)/T_A(F = 2 - 1) = 1,3$.

Подано результати спектральних спостережень темної молекулярної хмари в лінії молекули HCN ($J=1-0$). На ділянці $15' \times 5'$ виділено п'ять конденсацій. Вони співпадають в рамках похибок вимірювань з аналогічними конденсаціями, відміченими раніше при спостереженнях молекули NH_3 . Параметри ліній (швидкість, ширина ліній, інтенсивність) значно відрізняються в різних конденсаціях. На всій поверхні хмари спостерігається аномальне випромінювання надтонких компонент ліній HCN. Вивчався простірковий розподіл відношення інтенсивностей компонент. Найбільше відхилення від того, що повинно бути при умові термодинамічної рівноваги, зафіксовано в областях хмари, пов'язаних з ціанополіновою конденсацією, де $R_{02} = T_A(F = 0 - 1)/T_A(F = 2 - 1) = 1,3$.

1. Введение

Taurus Molecular Cloud-1 (ТМС-1) - плотная конденсация в южной части гигантского молекулярного облака Neiles Cloud 2 - является одним из наиболее исследованных объектов, и к настоящему времени в его спектре обнаружены линии почти всех молекул, наблюдающихся в межзвездной среде. Вследствие близости к Солнцу (140 pc) стало возможным подробное исследование ТМС-1 как области потенциального звездообразования. Первые изображения этого объекта [1-5] выявили ряд особенностей, выделяющих его среди других молекулярных облаков.

ТМС-1 имеет вытянутую в направлении SE-NW форму; соотношение размеров $8' \times 1',6$ (или $0,3 \times 0,06$ pc) измерено по изображению в ли-

нии HC_3N ($J = 1 - 0$), причем максимум излучения не совпадает с максимумом излучения в линии NH_3 и смещен на $8'$ в направлении SE. Наблюдатели отмечают высокое обилие молекул с длинными углеродными цепочками HC_nN , где $n = 3,5,7$ и т.д. В дальнейшем изображение этого объекта строилось по линиям многих молекул: NH_3 , HC_3N , HC_5N , CCH , HCO^+ , CS , CO [6 - 9]. Однако вследствие низкого углового разрешения тонкая морфологическая структура оставалась невыявленной. Наблюдения с высоким угловым разрешением [10, 11] позволили зафиксировать шесть деталей, две из которых совпадают с

максимумами излучения в линиях HC_3N и NH_3 .

Несмотря на то, что TMC-1 наблюдался во многих линиях, до настоящего времени отсутствует его изображение в линии молекулы HCN. Она относится к типу линейных многоатомных молекул, имеет высокий угловой момент и широко распространена в межзвездной среде.

Наличие сверхтонкой структуры уровней молекулы HCN выделяет ее из ряда других молекул. Все уровни $J > 1$ расщеплены на три подуровня $F = J + 1$; J ; $J - 1$ (J и F вращательный и угловой моменты молекулы), что приводит к образованию в спектре HCN трех и более компонент сверхтонкой структуры. В условиях LTE (температура возбуждения одинакова для всех подуровней) и малых оптических толщин интенсивности компонент определенным образом соотносятся между собой. Так, для перехода $J = 1 - 0$, наблюдаемого в 3-миллиметровом диапазоне, отношения компонент

$R_{02} = T_A(F=0-1)/T_A(F=2-1) = 0,6$. Из

наблюдений известно, что в теплых ($T_{kin} \approx 30K$) молекулярных облаках компонент

$F = 1 - 1$ ослаблен ($R_{12} < 0,6$), а R_{02} превышает 0,2 [12, 13]. В работе [14] отмечается, что для образования таких аномалий в спектре HCN необходимым условием является возбуждение молекулами H_2 и высокая населенность второго вращательного уровня с последующим обратным спонтанным переходом $J = 2 - 1$. В дальнейшем была развита модель, предложенная Готтлибом и др. [15], согласно которой уменьшение R_{12} обусловлено перекрытием сверхтонких компонент в переходе $J = 2 - 1$, что приводит к переносу населенности с подуровня $J = 1$, $F = 1$ на $J = 1$, $F = 2$ и увеличению центральной компоненты. Накопленный наблюдательный материал позволяет рассмотреть различные механизмы образования аномалий в теплых молекулярных облаках [16].

Второй тип аномалии наблюдается в темных холодных ($T_{kin} \approx 10K$) молекулярных облаках. Выполненные к настоящему времени наблюдения [17 - 19] показывают, что в этих объектах интенсивности боковых компонент перехода $J = 1 - 0$ увеличены относительно центральной. В большей степени этот эффект проявляется в TMC-1, у которого $R_{02} \approx 1$ в точке максимума в линии NH_3 [17] и ≈ 2 в

точке максимума в линии HC_3N [20]. Учет перекрытия компонент сверхтонкой структуры позволил согласовать наблюдательные данные для некоторых темных молекулярных облаков [20, 22], однако во всех случаях R_{02} оставалось < 1 . В работе [23] показано, что без окружающей оболочки, плотность которой на порядок меньше плотности центральной части облака, невозможно получить большие значения R_{02} . В частности, для TMC-1 роль оболочки может выполнять Heiles Cloud 2.

Ярко выраженные аномалии в спектре TMC-1 в настоящее время не поддаются строгой теоретической интерпретации. Информация об аномалиях сверхтонкой структуры ограничена измерениями только в двух точках - областях максимумов излучения в линиях HC_3N и NH_3 . Для восстановления физических условий в облаке этого явно недостаточно. В настоящей работе мы представляем результаты наблюдений с высоким спектральным и угловым разрешением по всей поверхности TMC-1. Основное внимание уделялось морфологии облака в линии HCN и распределению аномалий по картинной плоскости.

2. Наблюдения

Наблюдения были проведены в период с 15 по 21 октября 1994 г. Радиотелескоп RT-22 (Крымская астрономическая обсерватория, пос. Симеиз) с диаметром главного зеркала 22 м был оборудован 3-миллиметровым приемником с мазером на входе. Шумовая температура приемника в однополосном режиме составила 50 К [24], полоса частот усилителя 40 МГц. Общая полоса используемого фильтрового спектрального анализатора была 12 МГц со спектральным разрешением 100 кГц, что соответствует 0,337 км/с на частоте 88,631 ГГц. Ширина луча телескопа на уровне половинной мощности (40") оценена по наблюдениям планет и сильных источников, излучающих в континууме. Эффективность главного луча ($\approx 0,4$) определялась путем сравнения наших наблюдений линий HCN и HCO⁺ в Орион KL с результатами тех же наблюдений на 20-метровом телескопе в Онсала (Швеция) [25]. Точность наведения телескопа контролировалась по планетам и SiO-источникам. Среднеквадратичная ошибка наведения по азимуту и углу места 15".

Наблюдения проводились методом переключения луча (ON - ON). Пространственный разброс двух лучей 7'. Общее время одного наблюдения 20'. Калибровка осуществлялась обычным методом (chopper-wheel technique) по

сравнению с температурой черного тела, равной температуре окружающей среды. Результаты наблюдений представлены в единицах яркостной температуры, скорректированные на потери в атмосфере, а также на омические потери и потери на "перелив", относящиеся к антенне [26].

3. Изображение молекулярного облака ТМС-1 в линии HCN (J = 1 - 0) и аномалии сверхтонкой структуры

На рис.1 представлено распределение интенсивности излучения молекулы HCN по поверхности облака ТМС-1. Излучение интегрировано по профилям линий и суммировано по трем компонентам сверхтонкой структуры. Положения измеряемых точек отсчитывались в угловых минутах относительно цианополиинового пика (на рис.1 обозначен D) с координатами $\alpha^{(1950)} = 04^h 38^m 38^s$ и $\delta^{(1950)} = 25^\circ 36' 00''$. Объект занимает площадь $15' \times 5'$ и имеет форму, вытянутую в направлении SE - NW.

Ранее многие наблюдатели отмечали, что изображение этого объекта в линиях различных молекул часто не совпадают. Наибольшие отличия зафиксированы в линиях HC_3N и NH_3 [10, 11]. Изображения в линии HC_3N имеет эллиптическую форму без каких-либо

ярко выраженных деталей. Центр эллипса и максимум излучения находятся вблизи цианополиинового пика. Изображение в линии NH_3 имеет несколько фрагментаций, расположенных вблизи большой оси облака, а абсолютный максимум излучения приходится на область, смещенную на $8'$ в направлении NW относительно пика D.

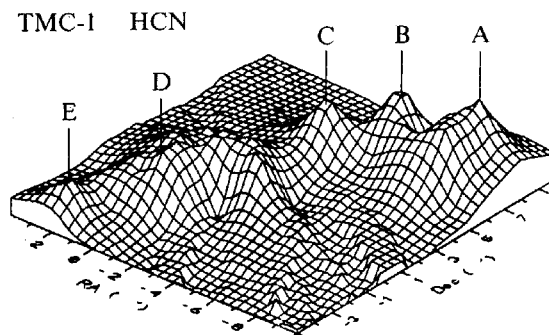


Рис. 1. Изображение темного молекулярного облака ТМС-1 в линии HCN (J=1-0). Вверх отложена интегральная суммированная по трем компонентам интенсивность $\int T_A dv$. Выделенные особенности обозначены A, B, C, D и E.

Таблица
Некоторые параметры спектров в точках максимумов интенсивностей излучения в линии HCN

Обозначение ($\Delta\alpha; \Delta\delta$) ¹	V_{LSR}^2 (км/с)	ΔV^2 (км/с)	R_{02}^3	R_{12}^3
A (-8;8)	4,7	0,6	0,82	0,64
B (-5; 7) NH_3	4,6	0,5	0,93	0,71
C (-3;5)	4,5	0,4	0,64	0,69
D (0;1) HC_3N	4,8	0,6	1,29	0,78
E (-2;4)	4,5	0,4	0,73	0,56

¹ Координаты в угловых минутах относительно цианополиинового пика $\alpha^{(1950)} = 04^h 38^m 38^s$ и $\delta^{(1950)} = 25^\circ 36' 00''$.

² Точность определения V_{LSR} и ΔV не хуже 0,1 км/с.

³ Измерены по отношению антенных температур компонент $R_{02} = T_A(F=0-1)/T_A(F=2-1)$ и

$R_{12} = T_A(F=1-1)/T_A(F=2-1)$.

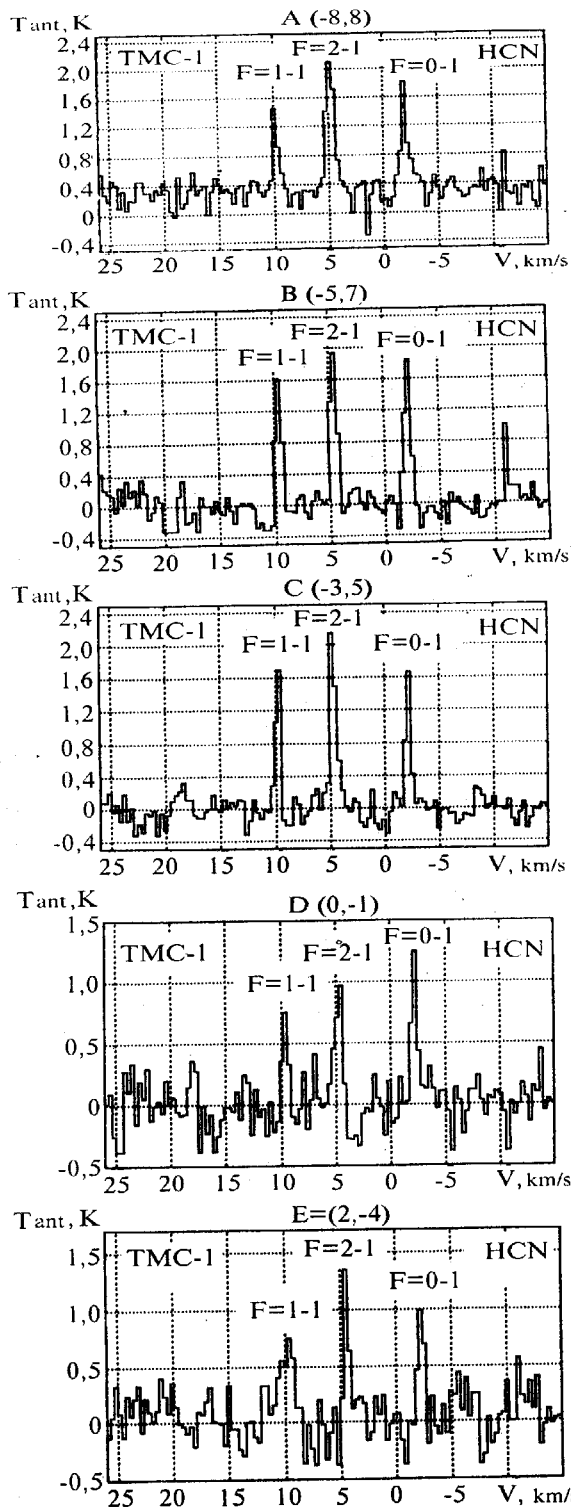


Рис. 2. Спектры особенностей А, В, С, D в линии HCN (J=1-0)

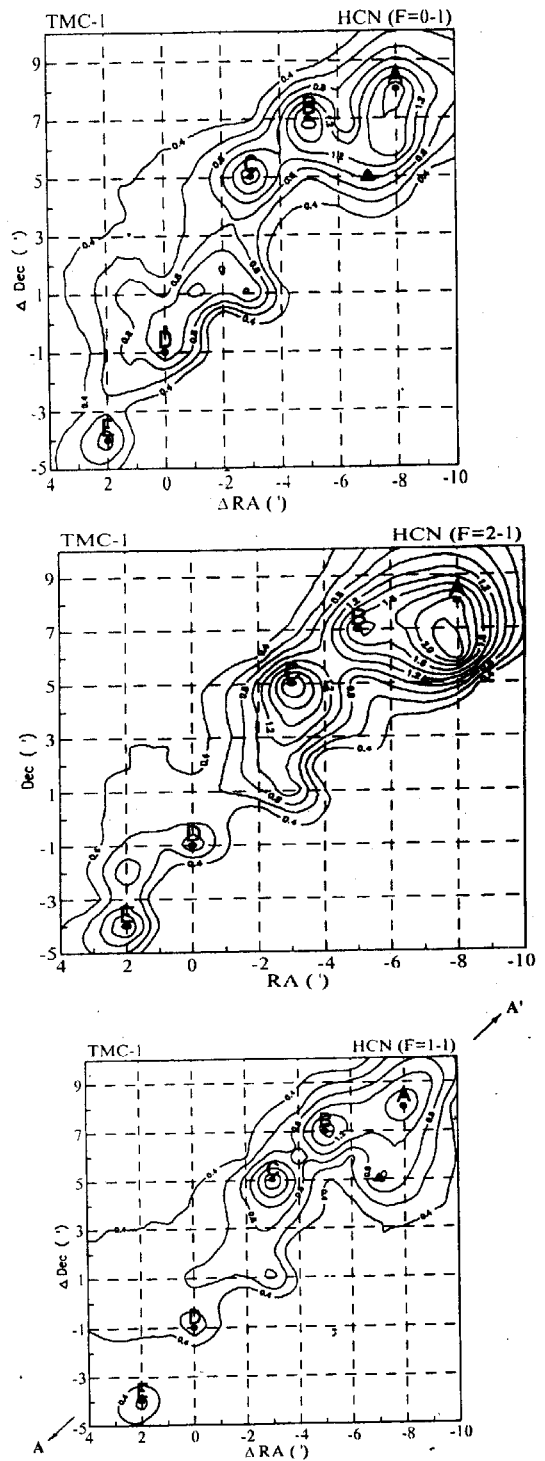


Рис. 3. Карты молекулярного облака TMC-1 в компонентах тонкой структуры HCN (O=1-0) а - F=0-1; F=2-1; F=1-1 Начальный уровень $\int T_A dv = 0,4 \text{ K км/с}$ шаг $0,2 \text{ K км/с}$. Линией А-А' обозначена главная ось облака. Треугольник - инфракрасный источник

По нашим наблюдениям изображение ТМС-1 в линии HCN хорошо согласуется с изображением в линии NH₃. Как видно из рис.1 на поверхности облака надежно выделяются пять областей, в которых интенсивность излучения возрастает (они обозначены А, В, С, D, Е), а абсолютный максимум излучения связан с областями А и В.

На рис.2 воспроизведены спектры ТМС-1 в точках А, В, С, D, Е. Основные наблюдаемые параметры спектров см. в табл.1. Сюда входят обозначения фрагментации и в скобках их положение относительно цианополиинового пика в угловых минутах ($\Delta\alpha; \Delta\delta$); скорость V_{LSR} и ширины линий ΔV , усредненные по гауссовским профилям трех компонент сверхтонкой структуры: относительно интенсивности компонент R_{02} и R_{12} .

Сравнение с аналогичными данными для линии NH₃ показывает, что положения фрагментаций А, В, С, D, Е в облаке, их скорости и ширины линий согласуются в пределах ошибок.

Проведенные наблюдения свидетельствуют о том, что на всей поверхности ТМС-1 соотношения компонент сверхтонкой структуры линии HCN ($J=1-0$) не соответствуют состоянию локального термодинамического равновесия. Такие несоответствия в различной степени характерны для всех без исключения полученных спектров. Наглядное представление о распределении аномалий по поверхности облака дают карты, построенные отдельно для каждой компоненты. На рис.3 приводятся интегральные изображения ТМС-1 в компонентах $F=0-1$, $F=2-1$ и $F=1-1$. Видно, что общий поток излучения облака в компоненте $F=0-1$ лишь немногим меньше потока в $F=2-1$. Это означает, что аномальное излучение молекулы HCN приходит со всей поверхности облака, однако степень аномальности в его областях различна.

ТМС-1 имеет достаточно сложную морфологическую структуру (см.рис.1), включает в себя пять конденсаций с повышенным излучением в линии HCN. На рис.3 они наблюдаются во всех компонентах сверхтонкой структуры. В таблице приводятся относительные интенсивности компонент

$$R_{02} = T_A(F=0-1)/T_A(F=2-1) \text{ и}$$

$$R_{12} = T_A(F=1-1)/T_A(F=2-1),$$

измеренные в положениях А, В, С, D, Е. Отношения характеризуют степень аномальности источника.

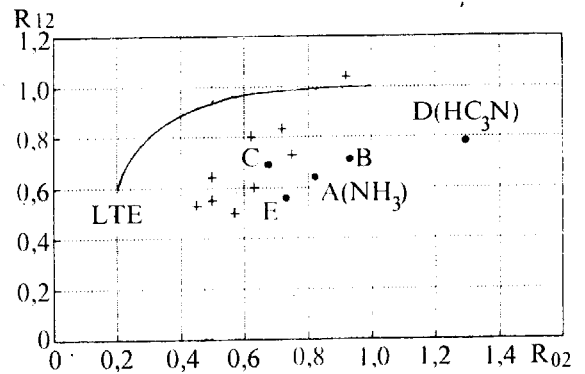


Рис. 4. Положения особенностей А, В, С, D, Е, на плоскости $R_{02}-R_{12}$. Кривой LTE отвечает значениям R_{02} и R_{12} при термодинамическом равновесии. Оптическая толщина возрастает вдоль кривой слева на право.

- - данные настоящей работы
- + - данные выборки [19]

Случаю малой оптической толщины соответствуют $R_{02} = 0,2$ и $R_{12} = 0,6$. Из таблицы видно, что во всех положениях величина R_{02} значительно выше. В точках А, В, С, Е она заключена в пределах $0,67 < R_{02} < 0,93$; в точке D (цианополииновый пик) оба отношения имеют наибольшие значения $R_{02} = 1,29$ и $R_{12} = 0,78$. Сказанное отражает рис.4. На плоскости $R_{02} - R_{12}$ нанесены точки из таблицы, соответствующие позициям А, В, С, Е, D, четыре первые лежат вблизи области, характерной для большинства темных молекулярных облаков, в спектрах которых зафиксированы аномалии сверхтонкой структуры в линии молекулы HCN. Знаком "плюс" отмечены положения таких объектов из однородной выборки [19]. Положение цианополиинового пика на плоскости $R_{02} - R_{12}$ делает его исключительным не только среди конденсаций внутри ТМС-1, но также среди других аналогичных объектов.

4. Заключение

В работе представлены результаты спектральных наблюдений темного молекулярного облака ТМС-1 в линии HCN ($J=1-0$). Всего получено 50 спектров высокого разрешения с шагом 1' и 1',4. Впервые построено изображение объекта в указанной линии. Для исследования аномалии сверхтонкой структуры в спектре HCN также построены карты отдельно для каждой компоненты $F=0-1$, $F=2-1$ и $F=2-1$.

Основные результаты наблюдений заключаются в следующем.

1. В изображении молекулярного облака TMC-1 выделено пять областей повышенного излучения в линии HCN (J = 1 - 0). Оно хорошо согласуется с изображением в линии NH_3 и не согласуется с изображением в линии HC_3N . Абсолютный максимум излучения в линии HCN совпадает с максимумом в NH_3 .

2. Аномальное соотношение сверхтонких компонент линии HCN наблюдается на всей поверхности облака. Наибольшие аномалии зафиксированы в области максимального излучения в линии HC_3N (цианополлиновый пик), где $R_{02} \approx 1.3$. Величина аномалий коррелирует с интенсивностью излучения в линии молекулы HC_3N и антикоррелирует с интенсивностью излучения в линиях HCN и NH_3 .

3. Не подтверждено значение $R_{02} \approx 2$ для цианополлинового пика, приведенное в [20]. Несмотря на то, что полученные четыре годами ранее спектр TMC-1 [24] и спектр на рис.2(б) не имеет видимых отличий, не исключена долговременная переменность интенсивностей компонент линии HCN в области цианополлинового пика.

По наиболее важным параметрам, наиболее близким к TMC-1 является объект L1551. Согласно [19] максимумы излучения в линиях HCN и NH_3 совпадают и приходятся на центр облака, а наибольшее значение R_{02} наблюдается в удалении от центра, где излучение в линиях HCN и NH_3 минимально. Судя по приведенным в [19] спектрограммам, величина R_{02} возможно, достигает 1 (на рис.4 использованы R_{01} и R_{12} для центра L1551).

При однородном химическом составе решающим фактором может оказаться наличие внутри облака инфракрасного источника, в центре ионизирующего излучения. В TMC-1 и L1551 таким центром является IRAS 04381+2540 (на рис.3 обозначен треугольником) и IRS-5. В обоих случаях они расположены вблизи максимума излучения в линиях HCN и NH_3 и удалены от области максимальных значений R_{02} . Сопоставив наблюдательные данные для двух темных молекулярных облаков TMC-1 и L1551, можно предположить, что наибольшие аномалии сверхтонкой структуры HCN ассоциируются с периферийными обла-

стями вдали от ИК-источников. Эти области характеризуются повышенным излучением в линии HC_3N и минимумом излучения в линиях HCN и NH_3 .

В работе [23] рассчитаны спектры HCN для различных вариантов модели молекулярного облака с движущейся оболочкой, однако интерпретация величины $R_{02} \approx 2$ [20] встречается со значительными трудностями. Если дальнейшие исследования подтвердят, что в области цианополлинового пика R_{02} не превышает 1.3, то наблюдаемые отношения компонент HCN согласуются с рассчитанными в варианте с оболочкой, расширяющейся с положительным градиентом скорости.

Литература

- Churchwell E. et al. // *Astron. and Astrophys.*, 1978, 67(139).
- Little et al. // *MNRAS*, 1979, 189 (539).
- Tolle J.F., Ungerechts H., Walmsley C.M., Winnemisser G., Churchwell E. // *Astron. and Astrophys.*, 1981, 95 (143).
- Bujarrabal V., Guellin M., Morris M., Thaddeus P. // *Astron. and Astrophys.*, 1981, 99 (239).
- Wooten et al. // *Astrophys. J.*, 1980, 239 (844).
- Колотовкина С.А., Сороченко Р.Л., Толмачев А.М. // *ИАЖ*, 1986, 12, 12 (903).
- Snell R.L., Lander W.D., Frerking M.A. // *Astrophys. J.*, 1982, 255 (149).
- Schloerb F.P. et al. // *Astrophys. J.*, 1983, 267 (163).
- Guellin M., Lander W.D., Wilson R.W. // *Astron. and Astrophys.*, 1982, 107 (107).
- Olano C.A., Walmsley C.M., T. Wilson T.L. // *Astron. and Astrophys.*, 1988, 196 (194).
- Hirahara Y. et al., 1992, 394 (539).
- Wanner P.G., Encenaz P.J., Wilson R.W., Penzias A.A. // *Astrophys. J.*, 1974, 190 (177).
- Gottlieb C.A., Lada C.J., Gottlieb W.E., Lilley A.E., Litvak M.M. // *Astrophys. J.*, 1975, 202 (655).
- Kwan J. // *Astrophys. J.*, 1974, 191 (653).
- Guelloteay S., Boudry A. // *Astron. and Astrophys.*, 1981, 97 (213).
- Зинченко Н.И., Пирогов Л.Е. // *АЖ*, 1987, 64, 3(483).
- Walmsley C.M., Churchwell E., Nash A., Fitzpatrick E.F. // *Astrophys. J.*, 1982, 258 (L75).
- Churchwell E., Nash A., Walmsley C.M. // *Astrophys. J.*, 1984, 287 (681).

19. Harju J. // *Astron. and Astrophys.*, 1989, 219 (293).
20. Irvine W.M., Schloerb F.P. // *Astrophys. J.*, 1984, 282 (816).
21. J.Cernicharo J., Castets A., Duvert G., Guelloteay S. // *Astron. and Astrophys.*, 1984, 139 (L113).
22. Лапинов А.В. // *АЖ*, 1989, 66, 2 (22).
23. Gonzalez-Alfonso E., Cernicharo J. // *Astron. and Astrophys.*, 1983, 279 (506).
24. Шульга В.М., Зинченко И.И., Нестеров Н.С. и др. // *ПАЖ*, 1991, т.17, № 12 (1084).
25. Зинченко И.И., Буров А.В., Вдовин В.Ф. и др. // *ПАЖ*, 1987. т.3, с.587.
26. Johansson L.E.B., Anderson C., Ellder J., Friberg P., Hjalmanson H., Hoglund B., Irvine W.M., Olafsson H., Rydbeck G. // *Astron. and Astrophys.*, 1984, 130 (227). 27. Kutner M.U., Ulich B.U. // *Astrophys. J.*, 1981, 250 (341). V.M.Shulga, V.V.Myshenko, E.A.Nazarov, A.V.Antjufeev, L.B.Knjaz'kov, L.N.Litvinenko, I.I.Zinchenko, A.V.Lapinov, L.E.Pirogov

Molecular Cloud TMC-1 in the HCN ($J = 1 - 0$) Molecular Line

Results of spectral observations of the dark molecular cloud TMC-1 in the HCN ($J = 1 - 0$) line are presented. A 15 arc min \times 5 arc min area shows five condensations, coinciding to within the measurement errors with similar formations earlier revealed by measurements in the NH_3 molecular line. The HCN line parameters for individual condensations (ray velocities, linewidth and intensities) are greatly different. Anomalous hyperfine structure emissions of the line are observed over the entire surface of the object. The distribution of intensity component ratios over the image plane of the cloud has been studied. The greatest deviations from the local equilibrium state (LTE) have been detected in the vicinity of the cyanopolyne peak, where

$$R_{02} = T_A(F = 0 - 1) / T_A(F = 2 - 1) = 1,3.$$