МЕТАНОЛЬНЫЕ МАЗЕРЫ I КЛАССА В ОБЛАСТЯХ ОБРАЗОВАНИЯ ЗВЕЗД МАЛОЙ МАССЫ

С. В. Каленский[1], С. Куртц[2], В. И. Слыш[1], П. Хофнер[3], С. М. Уолмсли[4], Л. Е. Б. Юханссон[5], П. Бергман[5]

[1]*Астрокосмический центр*
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
e-mail: kalensky@asc.rssi.ru

[2] *Центр радиоастрономии и астрофизики*
Национальный университет Мехико (Морелия, Мичоасан, Мехико)

[3] *Национальная радиоастрономическая обсерватория, Сокорро, NM 87801*

[4] *Обсерватория Арчетри, Италия*

[5] *Онсальская космическая обсерватория, Онсала, Швеция*

В результате обзора молодых биполярных потоков в областях образования звезд малой массы в нескольких мазерных переходах метанола, относящихся к I классу, обнаружено четыре кандидата в мазеры (NGC 1333I2, NGC 1333I4A, HH25MMS и L1157) в линии $7_0 - 6_1A^+$ на частоте 44 ГГц и еще один (NGC 2023) в линии $4_{-1} - 3_0E$ на частоте 36 ГГц. Плотность потока линий, обнаруженных на 44 ГГц, не превышает 11 Ян, а светимость источников составляет порядка 10^{22} эрг/с, что намного ниже светимости сильных мазеров, наблюдающихся на 44 ГГц в областях образования звезд большой массы. Все новые мазеры на 44 ГГц были найдены в молекулярных облаках с лучевой концентрацией метанола выше, чем 10^{14} см$^{-2}$. Переменность источников NGC 1333I4A, HH25MMS и L1157 не обнаружена. В результате наблюдений объекта L1157 с помощью антенной решетки VLA были найдены два мазера, связанные со сгустками газа, которые наблюдаются в тепловых линиях метанола и некоторых других молекул. Мазеры могут формироваться в турбулентном газе за фронтом ударной волны. С другой стороны, форма линий, которые наблюдаются в M1 и M2, указывает на то, что эти мазеры могут возникать в коллапсирующих облаках.

ВВЕДЕНИЕ

Яркие и узкие мазерные линии метанола (CH_3OH) были обнаружены во многих областях звездообразования. Ментен [9] разделил метанольные мазеры на два класса, I и II, причем для каждого класса характерен строго определенный набор переходов. Мазеры I класса излучают в линиях $7_0 - 6_1A^+$ на частоте 44 ГГц, $4_{-1} - 3_0E$ на 36 ГГц, $5_{-1} - 4_0E$ на 84 ГГц, $8_0 - 7_1A^+$ на 95 ГГц и т.д., а мазеры II класса – в линии $5_1 - 6_0A^+$ на частоте 6.7 ГГц, $2_0 - 3_{-1}E$ на 12 ГГц, в серии линий $J_0 - J_{-1}E$ на 157 ГГц и т. д. Мазерам как I, так и II класса часто сопутствуют широкие тепловые линии. Согласно современным представлениям, мазеры I класса возбуждаются за счет столкновений, а накачка мазеров II класса осуществляется за счет внешнего излучения.

Природа метанольных мазеров до сих пор не известна. Пламбек и Ментен [10] предположили, что мазеры I класса возникают в крыльях биполярных потоков, где обилие метанола и ряда других молекул повышено за счет испарения мантий пылинок. В пользу этого предположения говорит тот факт, что многие мазеры I класса пространственно совпадают с биполярными потоками [7]. Однако эта гипотеза не является общепризнанной, так как до сих пор не обнаружены высокоскоростные мазеры I класса.

Трудности в изучении метанольных мазеров частично возникают из-за того, что до сих пор эти мазеры наблюдались только в областях образования звезд большой массы. Эти объекты находятся далеко от Солнца (типичное расстояние – 2–3 кпк или больше) и непрозрачны в оптическом и даже ближнем ИК-диапазоне. В противоположность этому, известно множество областей образования звезд малой массы на расстоянии "всего" 200–300 пк, и в них не так сильно поглощение излучения в оптическом и ИК-диапазонах. Изучать мазеры в этих областях, вероятно, проще, чем в областях образования звезд большой массы. Поэтому мы, начиная с 2004 г., ищем в них мазеры I класса на 44 ГГц и 36 ГГц. Список источников состоит из молодых, хорошо коллимированных биполярных потоков и глобул, в которых идет процесс звездообразования.

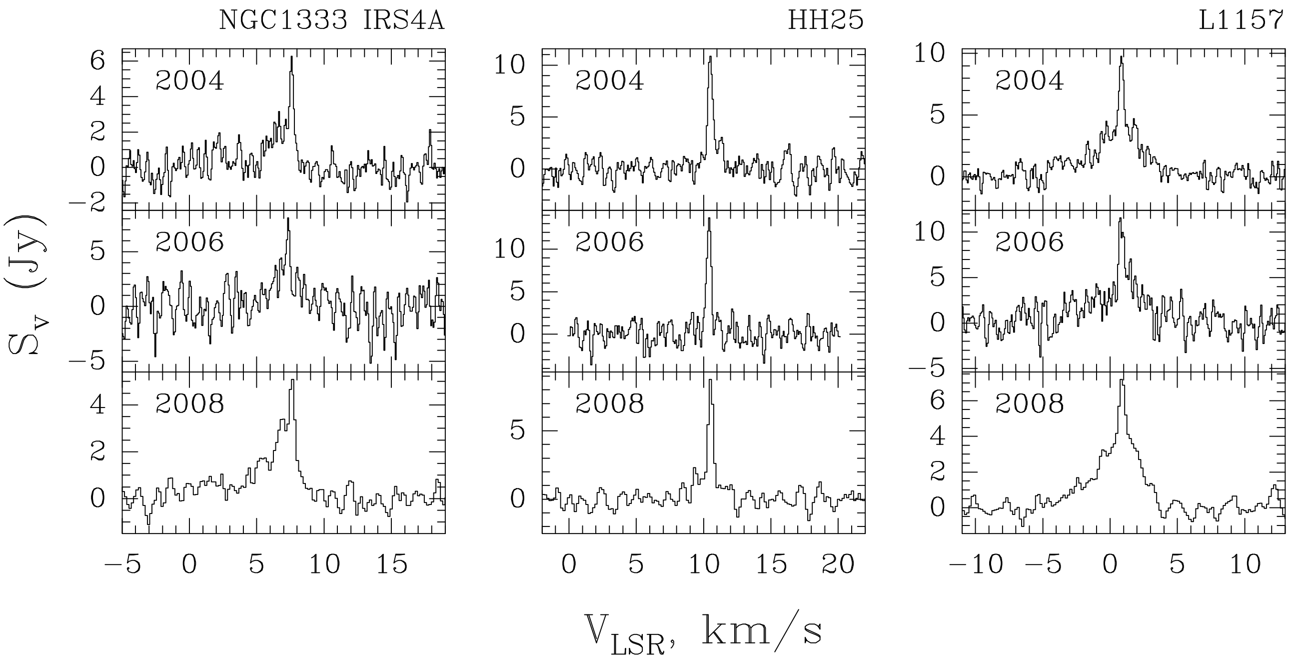


Рис. 1. Спектры, полученные в декабре 2004, 2006 и 2008 гг. в линии $7_0 - 6_1A^+$ на частоте 44 ГГц

НАБЛЮДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Обзор областей звездообразования проводился на 20-м антенне Онсальской космической обсерватории (OSO). Аппаратура и методика наблюдений описаны в [6]. К настоящему времени мы пронаблюдали 50 областей и обнаружили четыре узкие линии — кандидаты в мазеры на 44 ГГц — в областях NGC 1333I2, NGC 1333I4A, HH25 и L1157. Плотность потока всех обнаруженных линий не превышает 11 Ян, что соответствует светимости источников меньше или порядка 10^{22} эрг/с. Это намного ниже светимости сильных мазеров, наблюдающихся на 44 ГГц в областях образования звезд большой массы. Еще один кандидат в мазеры (NGC 2023) обнаружен на частоте 36 ГГц. Кроме того, на 44 ГГц были обнаружены широкие (5–6 км/с) линии в объектах S68N и Serpens CB2; широкая линия также была обнаружена в направлении Cep A(E) на частоте 36 ГГц. Один из вновь обнаруженных мазеров (L1157) мы пронаблюдали с помощью антенной решетки VLA в конфигурации D, которая обеспечивает угловое разрешение порядка $1''$ на частоте 44 ГГц.

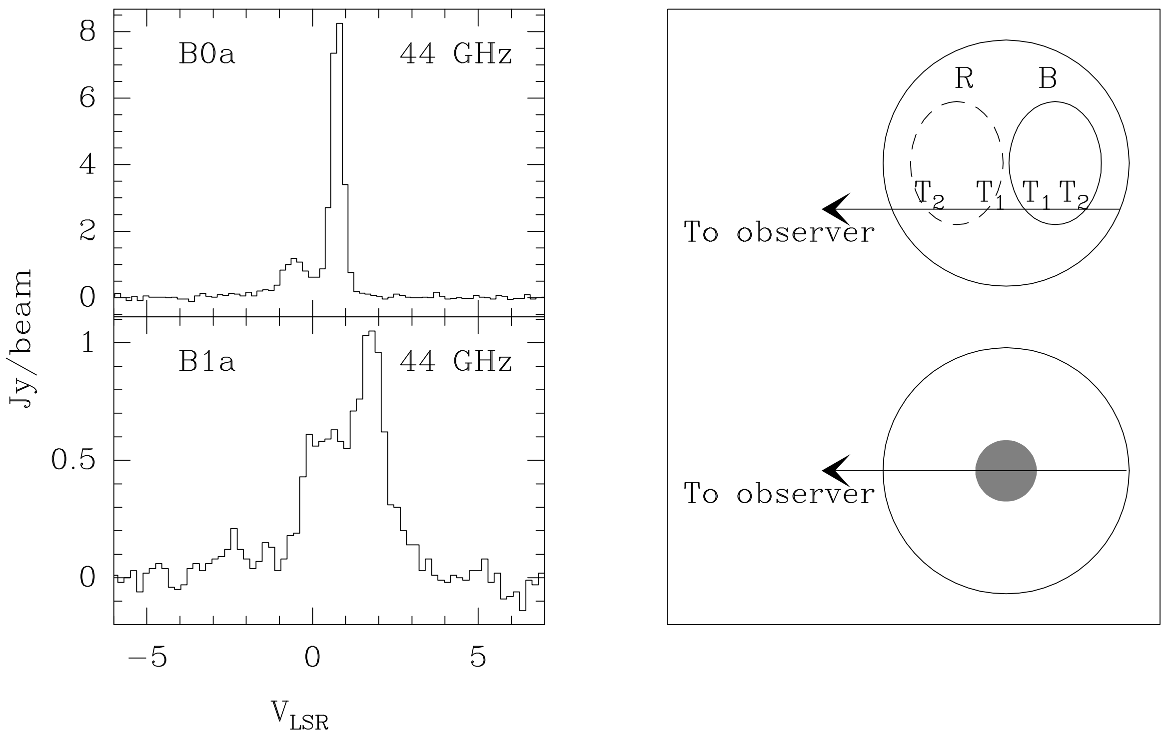
Таблица отрицательных результатов доступна на веб-сайте `http://tanatos.asc.rssi.ru/~kalensky`. Излучение не найдено в направлении 42 биполярных потоков. Верхние пределы на плотность потока на уровне 3σ составляют порядка 3–5 Ян. Таким образом, метанольные мазеры I класса в областях образования звезд малой массы являются редкими и/или слабыми объектами.

На рис. 1 приведены спектры трех кандидатов в мазеры, полученные на частоте 44 ГГц в декабре 2004, 2006 и 2008 годов. Небольшие изменения формы линий и понижение плотности потока всех источников на величину порядка 30% в 2008 году можно объяснить суммарным влиянием низкого отношения сигнал/шум, погрешностей калибровки и разного спектрального разрешения (0.17 км/с в 2008 г. и 0.085 км/с в 2004 и 2006 гг.). Тем не менее, предполагается и в дальнейшем проводить мониторинг этих источников.

В результате наблюдений на антенной решетке VLA мы обнаружили компактный источник в направлении сгустка B0a[1], который наблюдается в тепловых линиях метанола и других молекул [2]. Максимальная плотность потока (рис. 2, *а*, верхний спектр) соответствует яркостной температуре выше 2000 К, что указывает на мазерную природу источника.

Более слабый источник, обозначенный как M2, был обнаружен в направлении сгустка B1a. Его спектр приведен на рис. 2, *а* (нижний спектр). Плотность потока в максимуме соответствует яркостной температуре порядка 200 К, что существенно выше кинетической температуры газа в сгустке B1. Поэтому M2, вероятно, является слабым мазером.

[1] Обозначения сгустков в голубом крыле биполярного потока в L1157 взяты из [2].



а б

Рис. 2. Спектры M1 и M2 на частоте 44 ГГц (*а*). Схема, изображающая облако, коллапсирующее согласно модели Шу (верхний рисунок) и Ларсона–Пенстона (нижний рисунок) (*б*)

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный обзор показал, что метанольные мазеры I класса в областях образования звезд малой массы намного слабее мазеров, связанных с протозвездами большой массы. Мы сравнили наши результаты с результатами обзора областей образования звезд малой массы в тепловых линиях метанола [5] и выяснили, что те области, в которых обнаружены мазеры на частоте 44 ГГц являются наиболее сильными тепловыми источниками и имеют лучевую концентрацию метанола порядка 10^{15} см$^{-2}$ или выше; лучевая концентрация метанола в источниках без мазеров намного меньше. Согласно Каленскому и др. [5], полученные ими лучевые концентрации могут быть завышены в 3–8 раз, поэтому пороговое значение лучевой концентрации метанола, выше которой могут появляться мазеры на 44 ГГц, составляет порядка 10^{14} см$^{-2}$.

Светимости обнаруженных нами метанольных мазеров, полученные в предположении, что их излучение изотропно, составляют около 10^{22} эрг/с, что на несколько порядков величины ниже светимости подобных мазеров в областях образования звезд большой массы (10^{24}– 10^{25} эрг/с). Лучевая концентрация метанола (порядка 10^{15} см$^{-2}$) также меньше, чем соответствующая величина в областях образования звезд большой массы ($(2–74)\cdot 10^{16}$ см$^{-2}$ [3]). Таким образом, выявляется некоторая закономерность: в молекулярных облаках с лучевой концентрацией метанола ниже 10^{14} см$^{-2}$ мазеры на частоте 44 ГГц не образуются; в облаках с лучевой концентрацией метанола 10^{14}– 10^{15} см$^{-2}$ могут возникать (но не обязательно возникают) слабые мазеры со светимостью порядка 10^{22} эрг/с; в облаках с лучевой концентрацией метанола выше 10^{16} см$^{-2}$ могут возникать мощные мазеры со светимостью 10^{24}– 10^{25} эрг/с.

В литературе обсуждается несколько механизмов возникновения метанольных мазеров, которые могут быть “масштабированы” так, чтобы объяснить возникновение мощных мазеров именно в областях с высокой лучевой концентрацией метанола. Такими механизмами являются ударные волны, возникающие под действием высокоскоростных потоков, турбулентность, которая может привести к случайному увеличению длины когерентности вдоль некоторых направлений [15], и аккреционные ударные волны [7].

Два первых механизма будут обсуждаться далее. Может оказаться, что в разных областях работают разные механизмы возникновения мазеров и даже что разные механизмы ответственны за возникновение разных мазеров в одной и той же области.

Механизм возникновения метанольных мазеров за счет турбулентности был изучен Соболевым и др. [15]. Этот механизм основан на том, что переходы, относящиеся к I классу, обычно инвертированы в протяженных молекулярных облаках Галактики; тот факт, что при этом мы наблюдаем квазитепловые линии, означает, что оптическая толща в этих линиях мала [14]. Однако в турбулентной среде длина когерентности вдоль некоторых направлений может оказаться существенно выше, чем в среднем по облаку. Вдоль этих направлений и возникает сильное мазерное излучение.

Каленский и др. [6] проанализировали возможность объяснить возникновение мазеров в L1157 в рамках этой модели и пришли к выводу, что оптическая толща в B0a недостаточно высока. Поэтому была предложена следующая модель: по сгустку B0a проходит ударная волна, за счет которой повышается обилие метанола в небольшой части сгустка. Повышение обилия приводит к увеличению оптической толщи в различных переходах метанола, что и позволяет объяснить возникновение мазеров в рамках модели Соболева и др. [15].

Возникает вопрос, почему наиболее яркий мазер возникает именно в сгустке B0a, а не в сгустках, которые демонстрируют более яркие тепловые линии метанола. Возможно, плоскость ударной волны, проходящей через B0a, ориентирована так, что Солнечная система лежит в этой плоскости. Если слой газа с повышенным обилием метанола достаточно тонок, то наиболее сильные мазеры должны излучать в плоскости ударной волны. Ударные волны, проходящие по другим сгусткам, могут иметь неподходящую ориентацию для того, чтобы мазерное излучение распространялось в направлении Солнечной системы.

Анализ спектров M1 и M2 позволяет предложить альтернативную интерпретацию результатов. На рис. 2 видно, что обе мазерные линии являются двойными. Известно, что тепловая линия, состоящая из двух компонентов с "голубой" асимметрией (то есть голубой компонент сильнее красного), является признаком гравитационного сжатия облака [17]. В спектрах M1 и M2, наоборот, видна "красная" асимметрия. Однако можно показать, что именно "красная" асимметрия должна наблюдаться в мазерных линиях I класса в случае гравитационного сжатия. Модель метанольных мазеров, возникающих в коллапсирующих протозвездах была предложена Стрельницким [16] в 1981 году, однако дальнейшего развития не получила. Наши результаты, возможно, возродят интерес к этой модели.

Модель коллапса, распространяющегося наружу (inside-out collapse) была предложена Шу [13]. Согласно этой модели, плотность и скорость в коллапсирующем облаке имеют вид $n \propto r^{-1.5}$ и $v \propto r^{-0.5}$. Точки с одинаковыми лучевыми скоростями образуют петли (см. рис. 2, *б*, верхний рисунок). Вдоль каждого луча зрения есть две точки с одинаковой лучевой скоростью. Разность между яркостной температурой излучения, смещенного в голубую (T_B) и красную (T_R) сторону, можно найти с помощью выражения:

$$T_B - T_R = (T_1 - T_2)(1 - e^{-\tau 1})(1 - e^{-\tau 2}), \tag{1}$$

где $\tau 1$ и $\tau 2$ – значения оптической толщи, соответствующие внутренней и внешней точкам. Температура возбуждения тепловых линий во внутренних, более плотных областях T_1, как правило, бывает выше, чем температура возбуждения T_2 во внешних, менее плотных областях; при этом $T_B > T_R$. Однако в случае инвертированных мазеров I класса ситуация противоположная. В этом случае $\tau 1$ и $\tau 2$, а также T_1 и T_2 отрицательны и зависят от плотности, причем меньшей плотности соответствует меньшая абсолютная величина температуры возбуждения. Следовательно, $|T_2|$ оказывается ниже, чем $|T_1|$, что приводит к отрицательной величине множителя $(T_1 - T_2)$. Так как $\tau 1$ и $\tau 2$ имеют отрицательные значения, множитель $(1 - e^{-\tau 1})(1 - e^{-\tau 2})$ оказывается положительным, откуда следует, что $T_R > T_B$.

С помощью уравнения (1) можно показать, что "красная" асимметрия возникает и в том случае, когда населенности уровней в центральных частях коллапсирующего облака термализуются и T_1 становится положительной величиной.

Моделью, альтернативной модели Шу, является модель Ларсона–Пенстона [8]. Согласно этой модели, в коллапсирующем облаке плотность меняется с расстоянием от центра по закону r^{-2}, а скорость коллапсирующего газа не зависит от расстояния до центра и на начальной стадии коллапса примерно в два раза превышает скорость звука [8]. Схематическое изображение такого облака приведено на рис. 2, *б* (нижний рисунок). Излучение, смещенное в голубую сторону, наблюдается на фоне реликтового излучения с яркостной температурой 2.7 K и частично поглощается в термализованном ядре, то есть внутренней области, где плотность газа достаточно высока для того, чтобы подавить инверсию. Излучение, смещенное в красную сторону, наблюдается на фоне термализованного ядра и ничем не поглощается. Поэтому интенсивность спектральной детали, смещенной в красную сторону, оказывается выше, чем интенсивность детали, смещенной в голубую сторону. Таким образом, и модель Шу, и модель Ларсона–Пенстона предсказывают "красную" асимметрию мазерных линий I класса, что и видно на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате обзора молодых биполярных потоков в областях образования звезд малой массы в мазерных переходах метанола $7_0 - 6_1A^+$ на частоте 44 ГГц и $4_{-1} - 3_0E$ на частоте 36 ГГц, которые относятся к I классу, обнаружено четыре кандидата в мазеры (NGC 1333I2, NGC 1333I4A, HH25MMS и L1157) на частоте 44 ГГц и еще один (NGC 2023) на частоте 36 ГГц. Плотность потока линий, обнаруженных на 44 ГГц, не превышает 11 Ян, а светимость источников составляет порядка 10^{22} эрг/с, что намного ниже светимости мощных мазеров, наблюдающихся на 44 ГГц в областях образования звезд большой массы.

Все новые мазеры на 44 ГГц были обнаружены в облаках с лучевой концентрацией метанола выше, чем 10^{14} см$^{-2}$. Лучевая концентрация метанола в областях образования звезд большой массы еще выше. По-видимому, существует следующая закономерность: мазеры на частоте 44 ГГц не могут возникать в молекулярных облаках с лучевой концентрацией метанола ниже, чем 10^{14} см$^{-2}$; в облаках с лучевой концентрацией метанола 10^{14}– 10^{15} см$^{-2}$ могут возникать слабые мазеры со светимостью порядка 10^{22} эрг/с; в облаках с лучевой концентрацией метанола выше, чем 10^{16} см$^{-2}$, могут возникать мощные мазеры со светимостью 10^{24}– 10^{25} эрг/с.

В результате наблюдений источника L1157 с помощью антенной решетки VLA были найдены два мазера, связанные со сгустками газа, которые наблюдаются в тепловых линиях метанола и некоторых других молекул. Возможно, эти мазеры возникли в турбулентном газе за фронтом ударной волны. С другой стороны, форма линий, которые наблюдаются в M1 и M2, указывает на то, что эти мазеры могут быть связаны с коллапсирующими облаками.

Авторы благодарны сотрудникам VLA за проведение наблюдений и сотрудникам OSO за помощь во время наблюдений. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 04-02-17057 и 07-02-00248) и программы научных исследований РАН “Протяженные объекты во Вселенной”. Онсальская космическая обсерватория является государственной обсерваторией для проведения радиоастрономических исследований и работает под управлением Чалмерсовского технологического университета (Гётеборг, Швеция) и финансируется Шведским исследовательским советом по естественным наукам и Шведской коллегией по техническому развитию.

[1] *Bachiller R., Perez Gutierrez M., Kumar M. S. N., Tafalla M.* // Asnron. and. Astrophys. – 2001. – **372**. – P. 899.

[2] *Benedettini M., Viti S., Codella C., et al.* Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2007. – **381**. – P. 1127.

[3] *Каленский С. В., Слыш В. И., Вальтц И. Е.* Астрон. журн. – 2002 –**79,** – С. 112.

[4] *Каленский С. В., Промыслов В. Г., Слыш В.И. и др.* // Астрон. журн. – 2006. – **83**. – С. 327.

[5] *Каленский С. В., Промыслов В. Г., Виннберг А.* // Астрон. журн. – 2007. – **84**. – С. 48.

[6] *Kalenskii S.V., Kurtz, S., Slysh, et al.* // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2009. – готовится в печать.

[7] *Kurtz S., Hofner P., Alvarez C. V.* // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 2004. – **155**. – P. 149.

[8] *Larson R. B.* // Rept. Prog. Phys. – 2003. – **66**. – P. 1651.

[9] *Menten K. M.* // Astron. Soc. Pac. Conf. Ser. – 1991. – **16**, – P. 119.

[10] *Plambeck R. L., Menten K. M.* // Astrophys. J. – 1990. – **364**. – P. 555.

[11] *Pratap P., Shute P. A., Keane T. C., et al.* // Astron. J. – 2008. – **135**. – P. 1718.

[12] *Sandell G., Avery L. W., Baas F., et al.* // Astrophys. J. – 1999. – **519**. – P. 236.

[13] *Shu F. H.* // Astrophys. J. – 1977. – **214**. – P. 488.

[14] *Slysh V. I., Kalenskii S. V., Val'tts I. E., et al.* // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 1999. – **123**. – P. 515.

[15] *Sobolev A. M., Wallin B. K., Watson W. D.* // Astrophys. J. – 1998. – **498**. – P. 763.

[16] *Strelnitskij V. S.* // Soviet Astron. Lett. – 1981. – **7**. – P. 223.

[17] *Zhou S.* // Molecules in Astrophysics: Probes and Processes: Proc. IAU Symp. 178 / Ed. E. F. van Dishoeck. – Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1996. – P. 195.