АСТРОФИЗИКА

ТОМ 50 АВГУСТ, 2007 ВЫПУСК 3

СПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕКТА ХЕРБИГА-АРО HH43

Е.Р.ОГАНЕСЯН, Т.Ю.МАГАКЯН, Т.А.МОВСЕСЯН

Поступила 28 февраля 2007
Принята к печати 6 июня 2007

В работе представлены результаты интегральной спектроскопии объекта Хербига-Аро HH43. Спектры были получены при помощи мультизрачкового спектрографа и охватывают диапазон $\lambda\lambda 6400 - 6800$ Å. По отношениям эмиссионных линий, а также по значениям лучевых скоростей мы уточнили картину динамических процессов, которые имеют место в этом объекте, относящемуся к редкому классу "shocked cloudlet". В частности, точно определено положение ударной волны, подтверждающее правильность классификации объекта. Оценена степень потери вещества из звезды-источника.

Ключевые слова: *объекты Хербига-Аро - объект HH43*

1. *Введение*. Большинство наиболее ярких объектов Хербига-Аро (HH) хорошо изучено, но детали внутренней структуры многих из них пока не исследованы в должной степени. Для подобного анализа чрезвычайно полезным средством, позволяющим получить подробную картину физических явлений, происходящих в протяженных объектах, являются методы трехмерной спектроскопии, в частности - мультизрачковая спектроскопия, которая весьма эффективна для изучения отдельных HH-объектов и сгустков. Настоящая работа продолжает начатый в Бюраканской обсерватории цикл подобных исследований (см, например, [1,2]).

Ее целью является подробное изучение структуры и кинематики HH43 - одного из наиболее ярких HH-объектов, находящихся в Орионе, обнаруженного в числе самых первых образований этого типа [3,4]. Краткое описание ранних исследований HH43 и первые CCD изображения можно найти в работе [5].

Объект HH43 привлек наше внимание не только своей яркостью, но и интересными особенностями своей внутренней структуры. Практически все результаты предыдущих исследований (см. например [6,7]) указывали на то, что HH43 относится к довольно редкому типу HH-объектов, в которых зона максимального возбуждения расположена со стороны близлежащего к источнику объекта. К тому же внутри объекта наблюдается необычная картина поля скоростей [8].

Вопрос источника HH43 также оказался довольно запутанным.

Долгое время им считалась невидимая в оптическом диапазоне звезда HH43-IRS1 (IRAS 05357-0710) [9], отстоящая примерно на 1' от HH43. Впоследствии эта звезда оказалась двойной и связанной с инфракрасной биполярной туманностью [10-12]. Однако новейшие наблюдения в ИК и миллиметровом диапазоне [12] выявили расположенный значительно дальше другой объект - HH43-MMS1, который, по-видимому, представляет собой глубокопогруженную в облако чрезвычайно молодую звезду. Скорее всего, именно он и является истинным центральным источником HH43. Эти наблюдения также четко подтвердили, что HH43 вместе с объектами HH38 и HH64, а также несколькими менее заметными сгустками, составляет один весьма протяженный биполярный поток.

Несмотря на все вышесказанное, полного представления о внутренней структуре HH43 до сих пор не имеется, поскольку его интегральная спектроскопия не проводилась. Именно этот вопрос и рассматривается в данной статье в первую очередь.

2. *Наблюдения и их обработка*. Наблюдения HH43 проводились в ноябре 2002г. на 2.6-м телескопе Бюраканской обсерватории с помощью мультизрачкового спектрографа VAGR [13], установленного в первичном фокусе, и ПЗС-матрицы Loral с форматом 2058 x 2063 пикселей в качестве светоприемника. Рабочее поле составляло 40" x 40", с масштабом около 1.0"/зрачок. Для избежания перекрытия спектров был использован узкополосный интерференционный фильтр с диапазоном пропускания от 6400 Å до 6800 Å. В качестве диспергирующего элемента использовалась гризма, дающая дисперсию 2.1 Å/пиксел. Суммарная экспозиция объекта составила 3600 с.

Кроме того, мы использовали спектр HH43, полученный с той же системой 11 января 2005г. с суммарной экспозицией 3600 с, при разрешении 1.5 пиксел/Å в области линий Hα и [SII]. Эти наблюдения носили тестовый характер, и качество изображений было недостаточно хорошим для детального анализа внутренней структуры объекта, однако полученные данные позволяют уточнить лучевую скорость (см. ниже).

Первичная обработка полученных изображений проводилась специальным программным пакетом, разработанным в САО РАН [14]. Для дальнейшей обработки данных интегральной спектроскопии был применен программный пакет ADHOCw, (http://www-obs.cnrs-mrs.fr/ADHOC/adhoc.html), разработанный в Марсельской обсерватории. С его помощью производилось автоматическое извлечение индивидуальных спектров и калибровка по длинам волн. Полученные в итоге так называемые кубы данных были использованы для построения результирующих карт излучения объекта в линиях и континууме (используя измеренный поток в каждом зрачке), а также для определения лучевых скоростей линий.

3. *Полученные результаты и обсуждение.* Как известно, оптические изображения объекта HH43, особенно полученные в линии Hα, показывают наличие трех четко выраженных сгустков A, B и C, погруженных в общую оболочку [6]; при этом спектры сгустков B и C указывают на весьма низкий уровень возбуждения, хотя и не такой экстремальный, как в объекте HH7, а сгусток A имеет более высокое возбуждение [6,7]. На рис.1 представлены восстановленные нами из 3D-спектров изображения HH43 в линиях Hα, [SII] λ6716Å и [NII] λ6583Å. Сопоставление нашего изображения в Hα с прямым ПЗС-снимком, приведенным в [7], показывает превосходное согласие, что позволяет судить о качестве восстановления и пространственном разрешении наших спектров. Из рис.1 отчетливо видно, что во всех трех линиях наиболее ярким является сгусток B. Примечательно, что в [SII] сгусток A как отдельный структурный элемент вообще не

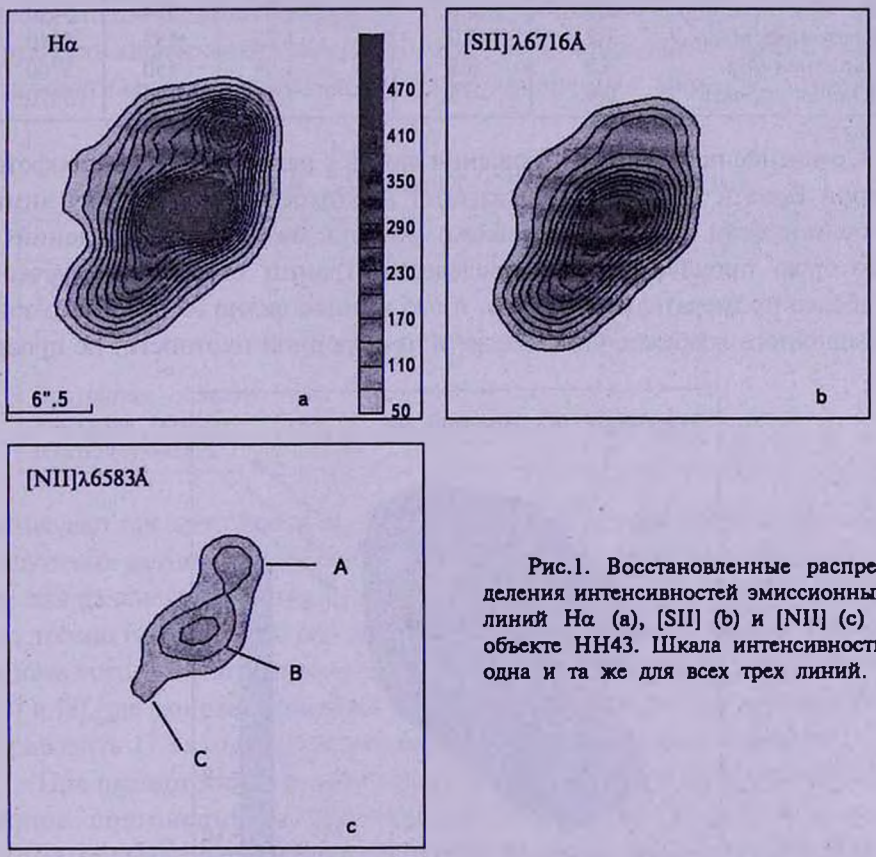

Рис.1. Восстановленные распределения интенсивностей эмиссионных линий Hα (a), [SII] (b) и [NII] (c) в объекте HH43. Шкала интенсивности одна и та же для всех трех линий.

выражен. В [NII] λ6583Å объект в целом слабее, чем в остальных линиях, что вполне типично для HH-объектов. Спектрофотометрические данные по эмиссионным линиям, усредненные по отдельным сгусткам, приведены в табл.1. Учет межзвездного поглощения не производился ввиду небольшого

спектрального диапазона. Полученные данные позволили также построить карты распределения отношений интенсивностей эмиссионных линий. На рис.2 показана такая карта для отношений интенсивностей Hα к линии [SII], демонстрирующая изменение степени возбуждения по объекту.

Таблица 1

ЗНАЧЕНИЯ ОТНОШЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ЛИНИЙ, ЭЛЕКТРОННЫХ ПЛОТНОСТЕЙ И ТЕМПЕРАТУР

	Hα/[SII] λ6716Å	Hα/[NII] λ6583Å	[SII]6716/ [SII]6731 Å	n_e (см$^{-3}$)	T_e
Область удара	4.5	3.5	0.90	750	6150
A	3.2	3.8	0.99	520	6000
B	1.6	4.5	1.0	490	5720
C	1.0	6.6	1.05	394	5490
Восточная обл.	1.2	5.0	1.25	152	5440
Западная обл.	3.2	6.5	1.05	450	5700
Южная область	0.9	----	1.12	290	5370

Сравнение полученных отношений линий с результатами спектрофотометрии Бема и Сольфа [7] показывает неплохое согласие между ними, особенно, если учесть совершенно разную методику наблюдений и некоторую произвольность определения границ отдельных сгустков. Наиболее примечательно, однако, и это хорошо видно из рис.2, что зона повышенного возбуждения (а также и электронной плотности) не просто

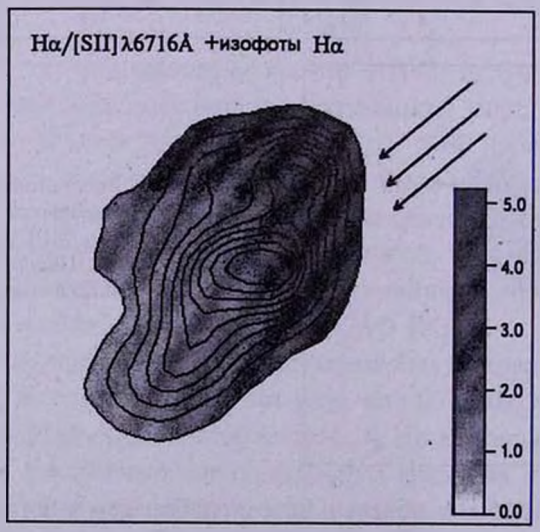

Рис.2. Распределение отношения Hα/λ6716Å [SII] по объекту, с наложенными изолиниями интенсивности HH43 в линии Hα. Стрелками показано направление возбуждающего потока от объекта HH43-MMS1.

совпадает со сгустком А, а представляет собой дугообразную область, охватывающую весь северо-западный край объекта.

Остальная часть объекта выглядит значительно более однородной по физическим параметрам. В частности, карта электронной плотности в остальном объекте почти гладкая. Впрочем, более внимательное рассмотрение показывает, что сгустки В и С имеют несколько большую электронную плотность по сравнению с общим фоном - тенденция, уже подмеченная в работе [7].

Несмотря на умеренное разрешение наших спектров, мы также предприняли попытку оценить значения гелиоцентрических лучевых скоростей отдельных сгустков и объекта HH43 в целом. Предыдущие исследования показали, что лучевые скорости в объекте HH43 невелики; скорее всего, поток, с которым он связан, движется близко к плоскости неба. Наши данные приведены в табл.2. Следует отметить, что из-за трудности калибровки мультизрачковых спектров они могут быть отягощены систематическими ошибками; однако внутренняя точность измерений

Таблица 2

ЗНАЧЕНИЯ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ (км/с)

	Hα	[SII]λ6716Å	[SII]λ6731Å	[NII]λ6583Å
Область удара	28	33	22	44
A	24	15	12	36
B	22	15	15	26
C	15	12	5	-
Восточная область	10	-7	4	-
Западная область	45	50	40	31
Южная область	2	-12	-4	-

позволяет провести поиск градиентов скорости внутри объекта. Поскольку ощутимых различий между скоростями линий Hα и [SII] не обнаружилось, то для дальнейшего повышения точности, поле лучевых скоростей было построено путем усреднения данных по всем трем линиям (рис.3). Отметим, кроме того, что при сравнении лучевых скоростей с результатами работ [7] и [8], где данные приведены к локальному стандарту покоя, необходимо прибавить 17.8 км/с для перехода к гелиоцентрическим скоростям.

При рассмотрении полученной нами картины, сразу же бросается в глаза явное повышение (в абсолютном смысле, до значений порядка +30 км/с) лучевой скорости в узкой дуге на северо-западном краю объекта, т.е. практически именно там, где наблюдается также повышение плотности и уровня возбуждения. Этот результат хорошо демонстрирует преимущество интегральной спектроскопии над щелевой: в работе [7] отмечено только, что в пределах сгустков внутри HH43 лучевая скорость

повышается примерно на 20 км/с. Наложение поля лучевых скоростей на карту изофот Hα (см. рис.3) в целом подтверждает этот любопытный эффект. Создается даже впечатление, что максимумы скоростей несколько смещены относительно пиков интенсивности сгустков, но этот факт должен быть проверен наблюдениями с большей дисперсией. Средняя же лучевая

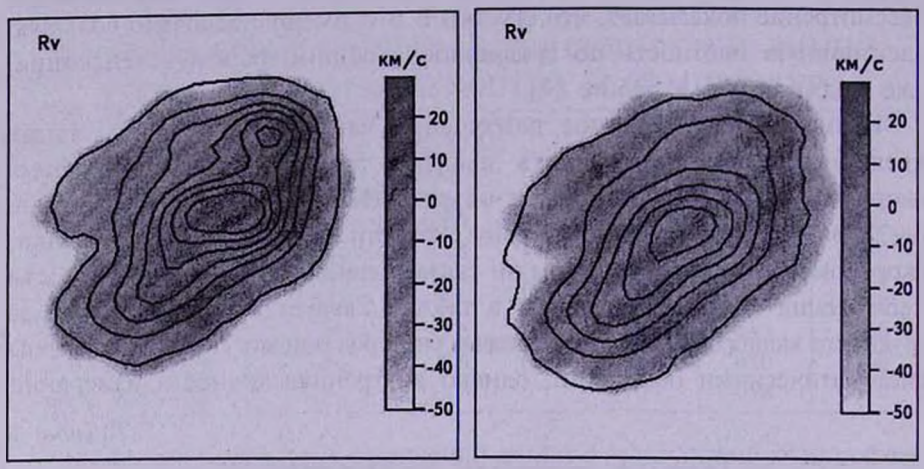

Рис.3. Распределение лучевой скорости в HH43, наложенное на карту изолиний интенсивности в линии Hα (слева) и в линии λ6716Å [SII] (справа).

скорость объекта HH43 по нашим данным составляет +16 ± 30 км/с, что немного отличается от оценок, приведенных в [7], которые дают значения от -10 до -15 км/с. Разумеется, могут иметь место систематические ошибки, о чем уже упоминалось выше. Есть также общая неопределенность при сопоставлении данных интегральной и щелевой спектроскопии протяженных объектов, связанная с трудностью фиксации точного положения щели на объекте. Для сравнения мы использовали упомянутый выше тестовый спектр HH43, имеющий повышенное разрешение, что дало очень похожие результаты: средняя гелиоцентрическая лучевая скорость HH43 получилась +10 км/с по эмиссии Hα и +14 км/с по [NII].

Таким образом, полученные результаты как нельзя лучше подтверждают предположение о том, что HH43 действительно относится к группе объектов типа "shocked cloudlet" (см работу [15], где впервые было допущено существование таких объектов и сделан их теоретический анализ). Более того, если в предыдущих работах такой вывод делался исходя из соотношения физических параметров сгустков внутри HH43, то теперь мы хорошо видим дугообразную область ударного возбуждения на краю объекта, ориентация которой полностью соответствует этой идее (см рис.2, где стрелкой обозначено направление на предполагаемый источник).

С целью дальнейшего уточнения физических условий внутри HH43

мы предприняли определение электронных температур по методу, предложенному в работе [16]. Этот метод в основном применяется к джетам и несколько неточен при использовании значений интенсивности Hα [17], однако в любом случае результаты, полученные этим методом, можно считать более точной оценкой электронных температур, чем стандартно принимаемое значение 10000 K (см, например, результаты, полученные нами для HH12 [2]). Уже с использованием этих значений T_e были получены и оценки электронных плотностей.

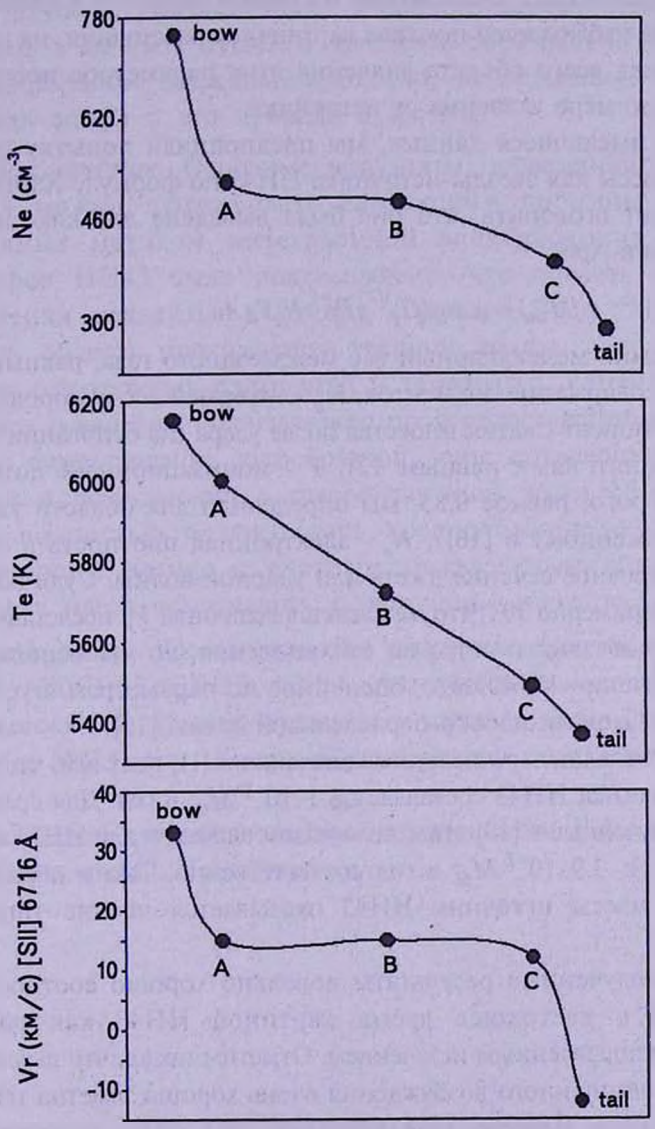

Рис.4. Изменение электронной плотности, температуры и лучевой скорости вдоль объекта HH43.

Эти результаты также представлены в табл.1. Как и следовало ожидать, непосредственно в дугообразной зоне столкновения электронная температура и плотность максимальны и равны соответственно 6150 K и 750 см$^{-3}$, а затем их значения плавно уменьшаются вдоль HH43, достигая минимума в южной части объекта - 5370 K и 150 см$^{-3}$. Для сравнения отметим, что, согласно работе [7], электронная плотность в среднем по объекту равна 600-700 см$^{-3}$ (при стандартной оценке T_e в 10000 K).

Для наглядности мы построили графики зависимости (рис.4) электронной плотности, температуры и лучевой скорости в линии серы (у других линий наблюдается похожая картина) от расстояния, на котором видно, что вдоль всего объекта значения этих параметров постепенно уменьшаются по мере удаления от источника.

Используя имеющиеся данные, мы предприняли попытку оценить темп потери массы для звезды-источника HH43 по формуле Хартигана и др. [18] (следует оговорить, что она была выведена для классических объектов Хербига-Аро):

$$\dot{M}_{out} = \mu m_H \langle C \rangle^{1/2} \langle I \rangle^{-1} N_e V_J A . \qquad (1)$$

Здесь μ - средний молекулярный вес межзвездного газа, равный ~1.24 для обычного содержания элементов, m_H - атомный вес водорода, $\langle C \rangle$ - средний коэффициент сжатия вещества после удара (на основании оценок из [18] он принят нами равным 12), I - ионизационный потенциал (значение которого, равное 0.85, мы определили для области удара по методу, предложенному в [16]), N_e - электронная плотность в области удара, A - поперечное сечение джета или ударной волны. Судя по рис.2, оно составляет примерно 10". Что же касается величины V_J, представляющей собой скорость звездного ветра до столкновения, то мы использовали *предударное* значение V=40 км/с, оцененное по параметрам сгустка B с использованием модели плоско-параллельной волны [19].

Подставив все вышеперечисленные значения в (1), получим, что потеря массы для источника HH43 составляет $3.1 \cdot 10^{-7}\, M_\odot$ в год. Для сравнения укажем, что полученные в [18] этим же методом значения для HH34 и HH47 равны $1.7 \cdot 10^{-7}$ и $3.9 \cdot 10^{-7}\, M_\odot$ в год соответственно. Таким образом, по темпу потери массы источник HH43 оказывается вполне типичным объектом.

Итак, все полученные результаты довольно хорошо соотносятся с общепринятой в настоящее время картиной HH43 как облачка, возбужденного направленным истечением. Отметим также, что выявленная нами область повышенного возбуждения очень хорошо заметна также на ИК-изображении в эмиссии молекулярного водорода, полученном с

помощью телескопа UKIRT [20], но имеет несколько больший размер. Общая морфология HH43 на этом изображении, которое в целом согласуется с приведенным в статье [12], но имеет лучшее разрешение, подтверждает идею о столкновении направленного потока с плотным облачком. В то же время отметим, что существуют и другие представления о природе HH43. В частности, в работе [8] авторы, опираясь на морфологические и кинематические данные, рассматривают HH43 как прецессирующий или вращающийся джет, что представляется, на наш взгляд, слишком далеко идущим утверждением. В любом случае, получение поля скоростей в объекте HH43 с высоким спектральным и особенно пространственном разрешении должно, по-видимому, окончательно разрешить споры о его природе и физике.

4. *Заключение*. Основные результаты проведенного нами исследования можно суммировать следующим образом. С помощью полученных методом интегральной спектроскопии физических параметров HH43 было подтверждено, что область повышенного возбуждения находится в районе сгустка HH43A. Мы конкретно очертили область прохождения ударной волны, а также уточнили значения электронных плотностей и температур, которые ранее были несколько завышены. Окончательно прояснилась картина возбуждения объекта: существование дугообразной зоны повышенной плотности, скорости и возбуждения в северо-западной части объекта, на наш взгляд, полностью подтверждает предположение о столкновении направленного потока с плотным межзвездным облачком. Также определена масса истекаемого из источника вещества.

Данная работа проводилась при поддержке грантов INTAS 4838 и NFSAT AS062-02./CRDF 12009. Авторы выражают благодарность Е.Г.Никогосян за ценные указания и рекомендации по обработке и анализу и М.Д.Смиту (Кентский университет) за полезное обсуждение.

Бюраканская астрофизическая обсерватория им. В.А.Амбарцумяна,
Армения, e-mail: Helen@web.am

THE SPECTRAL STUDY OF THE HH43 HERBIG-HARO OBJECT

E.R.HOVHANNISYAN, T.YU.MAGAKIAN, T.A.MOVSESSIAN

Results of the integral-field spectroscopy of HH43 are presented. Spectra were obtained with the multi-pupil spectrograph in λλ6400 – 6800Å range. Using the emission lines intensities ratios and radial velocities we got more specific picture of the processes taking place in this object, which belongs to the rare class of the "shocked cloudlets". In particular, the location of the shock wave, which supports this classification, is determined. The rate of mass loss from the source star is also estimated.

Key words: *objects Herbig-Haro - individual HH43*

ЛИТЕРАТУРА

1. *T.Yu.Magakian, T.A.Movsessian, K.Ogura, V.L.Afanasiev*, Astron. Astrophys., **383**, 598, 2002.
2. *Е.Р.Оганесян, Т.Ю.Магакян, Т.А.Мовсесян*, Астрофизика, **49**, 71, 2006.
3. *G.Haro*, Astrophys. J., **117**, 73, 1953.
4. *G.H.Herbig*, Lick. Obs. Bull, No.658, 1974.
5. *K.M.Strom, S.E.Strom, S.C.Wolff, J.Morgan, M.Wenz*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **62**, 39,1986.
6. *R.D.Schwartz, M.A.Dopita, M.Cohen*, Astron. J., **90**, 1820. (18), 1985.
7. *K.H.Bohm, J.Solf*, Astrophys. J., **348**, 297. (19), 1991.
8. *R.D.Schwartz, T.P.Greene*, Astron J., **117**, 456. (21), 1999.
9. *M.Cohen, R.D.Schwartz*, Astrophys. J., **265**, 877. (6), 1983.
10. *R.Gredel*, Astron. Astrophys., **292**, 580. (7), 1994.
11. *A.Monetti, B.Reipurth*, Astron. Astrophys., **301**, 721. (8), 1995.
12. *T.Stanke, M.J.McCaughrean, H.Zinnecker*, Astron. Astrophys., **355**, 639. (23), 2000.
13. *T.Movsessian, J.-L.Gash, J.Boulesteix, F.Zhamkotsian*, Baltic Astronomy, **9**, 518, 2000.
14. *V.V.Vlasyuk*, Bull. Special Astr. Obs., **36**, 107; 36, 118, 1993.
15. *R.D.Schwartz*, Astrophys. J., **223**, 884. (20), 1978.
16. *F.Bacciotti, C.Chuideri, E.Oliva*, Astron. Astrophys., **296**, 185, 1995.
17. *F.Bacciotti, J.Eislöffel*, Astron. Astrophys., **342**, 717, 1999.
18. *P.Hartigan, J.A.Morse, J.Raymond*, Astrophys. J., **436**, 125, 1994.
19. *R.Indebetouw, A.Noriega-Crespo*, Astrophys. J., **109**, 752, 1995.
20. *C.J.Davis*, частное сообщение.