

УДК 524.6-77

**А. В. Антюфеев, В. М. Шульга**

Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины  
61002 Харьков, ул. Краснознаменная 4

**Биполярный поток в области звездообразования  
IRAS 05345+3157 в линии молекулы  $^{13}\text{CO}$**

*Разработана методика определения физических параметров низкоскоростной части биполярного потока, основанная на анализе результатов наблюдений спектральных линий молекулы  $^{13}\text{CO}$ . Проведено картографирование области звездообразования большой массы IRAS 05345+3157 в линии молекулы  $^{13}\text{CO}$  ( $J = 1-0$ ) на частоте 110.2 ГГц. Анализ наблюдательных данных показал, что биполярный поток, наблюдавшийся ранее в этом объекте в линиях молекулы  $^{12}\text{CO}$ , также проявляется и в линии молекулы  $^{13}\text{CO}$  ( $J = 1-0$ ). По разработанной методике определены основные параметры биполярного потока.*

*БІПОЛЯРНИЙ ПОТІК В ОБЛАСТІ ЗІРКОУТВОРЕННЯ IRAS 05345+3157 В ЛІНІЇ МОЛЕКУЛИ  $^{13}\text{CO}$ , Антюфеев О. В., Шульга В. М. — Розроблено методику визначення фізичних параметрів низькошвидкісної частини біполярного потоку, що базується на аналізі результатів спостережень спектральних ліній молекули  $^{13}\text{CO}$ . Проведено картографування області зореутворення великої маси IRAS 05345+3157 в лінії молекули  $^{13}\text{CO}$  ( $J = 1-0$ ) на частоті 110.2 ГГц. Аналіз спостережних даних показав, що біполярний потік, що спостерігався раніше в цьому об'єкті в лініях молекули  $^{12}\text{CO}$ , також проявляється і в лінії молекули  $^{13}\text{CO}$  ( $J = 1-0$ ). За розробленою методикою визначено основні параметри біполярного потоку.*

*AN BIPOLAR OUTFLOW IN THE VICINITY OF IRAS 05345+3157 IN  $^{13}\text{CO}$  LINE, by Antyufeyev A. V., Shulga V. M. — A procedure for the determination of physical parameters of a low-velocity bipolar outflow is developed. The procedure is based on the analysis of observations of spectral lines of the  $^{13}\text{CO}$  molecule. The mapping of the massive star*

*formation region IRAS 05345+3157 is performed in the  $^{13}\text{CO}$  line at a frequency of 110.2 GHz (transition  $J = 1-0$ ). The bipolar outflow of the object is identified with  $^{13}\text{CO}$  ( $J = 1-0$ ). The main parameters of the bipolar outflow are determined with the use of the procedure developed.*

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время методы исследования биполярных потоков, как правило, базируются на анализе излучения спектральных линий вращательных переходов молекулы  $^{12}\text{CO}$ . При расчетах в большинстве случаев используется предположение о локальном термодинамическом равновесии. Также предполагается, что величина оптической толщины исследуемых линий значительно менее 1. В центральной части профиля линий молекулы  $^{12}\text{CO}$  оптическая толщина намного больше 1, поэтому анализируются только крылья линий. Такой подход дает информацию только о высокоскоростной части биполярного потока.

Информацию о низкоскоростной части биполярного потока можно получить из наблюдений вращательных переходов спектральных линий молекулы  $^{13}\text{CO}$ . Оптическая толщина линий молекулы  $^{13}\text{CO}$  в несколько десятков раз меньше, чем у молекулы  $^{12}\text{CO}$ . Следовательно, есть возможность рассчитать параметры биполярного потока в диапазоне скоростей, находящегося вблизи центра профиля линии.

Основная проблема при определении параметров низкоскоростной части биполярного потока — разделение движения вещества, которое определяется биполярным потоком и родительским облаком (микротурбулентное движение, вращение и т. д.). Для ее решения предлагается метод определения низкоскоростных параметров биполярного потока (МНСБП). Этот метод был применен для расчета физических параметров низкоскоростной части биполярного потока в области звездообразования AFGL 5157, в которой расположен инфракрасный источник IRAS 05345+3157.

Область в окрестности IRAS 05345+3157 известна как массивный молодой звездный объект, который в течении ряда лет неоднократно исследовался. В нем зарегистрировано две отражательные туманности, NGC1985 и GM39 [12], проведены континуальные наблюдения на длине волны 3.6 см [13], зарегистрирован мазер в линии  $6_{16}-5_{23}$  молекулы воды [13], получены карты в линии  $\text{HCO}^+$  ( $1-0$ ) [8]. В последнее время с помощью интерферометров активно исследуется ядро этого объекта. В работе [5] область IRAS 05345+3157 исследовалась в линии молекулы  $\text{N}_2\text{D}^+$ . Показано, что источник состоит из двух сгущений с массами 2 и 9 масс Солнца и размерами 0.05 и 0.09 пк.

Первое исследование биполярного потока в области IRAS 05345+3157 было проведено в линии  $J = 1-0$  молекулы  $\text{CO}$  в 1988 г. [11]. Затем аналогичные исследования с более высоким угловым разрешением

были проведены в линии  $J = 2-1$  молекулы CO [10, 14]. В 2009 г. были опубликованы результаты наблюдений IRAS 05345+3157, проведенных на интерферометре SMA с высоким угловым разрешением (2.87 3.6 ) [6]. В этой работе исследовался переход  $J = 2-1$  молекул  $^{12}\text{CO}$  и  $^{13}\text{CO}$ . Во всех случаях было проведено картографирование объекта и определены параметры биполярного потока по линиям молекулы  $^{12}\text{CO}$ . Наши исследования, проведенные в линии  $J = 1-0$  молекулы  $^{13}\text{CO}$ , относятся к низкоскоростной части биполярного потока.

Источник IRAS 05345+3157 имеет координаты  $_{2000} = 05^{\text{h}}37^{\text{m}}47.8^{\text{s}}$  и  $_{2000} = 31\ 59\ 24$  . Все карты, приведенные в данной работе, центрированы относительно этих координат.

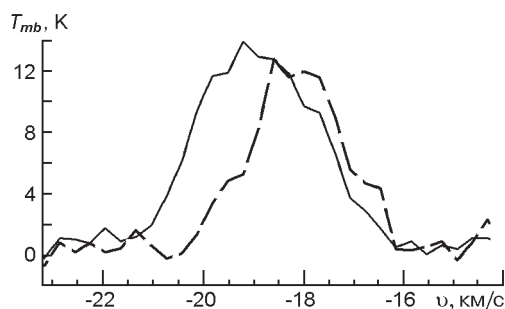
## НАБЛЮДЕНИЯ

Картографирование области IRAS 05345+3157 в линии  $J = 1-0$  молекулы  $^{13}\text{CO}$  проводилось в период с 27 сентября по 13 октября 2009 г. на радиотелескопе РТ-22 КрАО. Ширина диаграммы направленности на частоте 110 ГГц составляла 40 . При наблюдениях использовался криогенный приемник 3-миллиметрового диапазона длин волн с шумовой температурой около 100 К [9]. Шумовая температура системы в режиме однополосного приема сигнала составляла около 500 К в зависимости от погодных условий и угла поднятия источника над горизонтом. В качестве регистрирующего устройства использовался 512-канальный фурье-спектроанализатор и полосой обзора 14 МГц [1]. Для увеличения отношения сигнал/шум наблюдательные данные приводились к спектральному разрешению 112 кГц (0.3 км/с). Наблюдения проводились в режиме «навод-отвод». Время накопления в каждой точке составляло 12 мин. При этом характерное среднее квадратичное отклонение наблюдаемой антенной температуры составляло 0.2 К. Коэффициент использования диаграммы направленности антенны определялся по наблюдениям планеты Юпитер. Его значение для частоты 110 ГГц составило 0.15. Калибровка проводилась по черному телу стандартным методом, описанным в работе [7].

## ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ ВЕЩЕСТВА В ОБЛАСТИ IRAS 05345+3157

Анализ профилей линий  $J = 1-0$  молекулы  $^{13}\text{CO}$  области IRAS 05345+3157 показал, что центральные части линий различаются в различных областях молекулярного облака (рис. 1). Наиболее сильно эти различия проявляются в юго-восточной и северо-западной областях. Карты красносмещенной и синесмещенной составляющих показали биполярный характер этого отличия (рис. 2). Сравнение наших карт с картами биполярного потока, приведенными в работах [10, 11, 14] выявило близкое расположение красносмещенного и синесмещенно-

Рис. 1. Профили линий, снятые на различных позициях молекулярного облака: сплошная линия — в точке с координатами ( 0.53 , 1.5 ), пунктирная — в точке с координатами (1.06 , 0 )



го составляющих излучения молекул  $^{12}\text{CO}$  и  $^{13}\text{CO}$ . Эти смещения не могут быть связаны со сжатием (расширением) молекулярного облака, так как в этом случае не должно наблюдаться пространственно разнесенных биполярных компонентов. Признаков вращения облака, которое может быть второй причиной смещения центра линии, также не обнаружено.

На рис. 2 изображено пространственное распределение центральной скорости (рис. 2, *a*) и ширины линии на уровне 0.5 (рис. 2, *b*), полученных при аппроксимации каждого профиля функцией Гаусса. Эти результаты показаны фоновым серым цветом. Пунктирными и сплошными линиями даны изображения интегральных интенсивностей красносмещенной и синесмещенной частей молекулярного облака. Области наибольших изменений параметров линии совпадают с областями, где расположен биполярный поток. При этом смещение центральной скорости происходит в основном в направлении распространения биполярного потока (рис. 2, *a*). В северо-восточной и юго-западной части карты, где биполярный поток отсутствует, центральная скорость изменяется незначительно. Аналогичная ситуация имеет место для распределения ширины линий (рис. 2, *b*). Наибольшие ширины линий сосредоточены в области распространения биполярного потока. Вокруг биполярного потока спектральные линии более узкие, а распределение ширины линий более однородно.

В разных точках молекулярного облака вне зоны биполярного потока центральная скорость линии  $^{13}\text{CO}$  и ее ширина изменяются. Мы оценили масштаб этих изменений, предполагая, что они носят случайный характер. Среднее квадратичное отклонение центральной скорости и ширины линии, определенной из аппроксимации гауссианой, равно 0.2 и 0.23 км/с соответственно. Из рис. 1 видно, что смещение центральной скорости, вызванное биполярным потоком, составляет около 1 км/с, что значительно больше этих значений.

Исходя из вышесказанного, были сделаны следующие предположения. Вещество в молекулярном облаке по характеру движения можно разделить на две части: стационарное облако и биполярный поток. В стационарном облаке наблюдается только микротурбулентный тип движения вещества. Характеристики этого движения постоянны во всех точках стационарного облака. Любое отклонение характера движения в молекулярном облаке от микротурбулентного рассматривает-

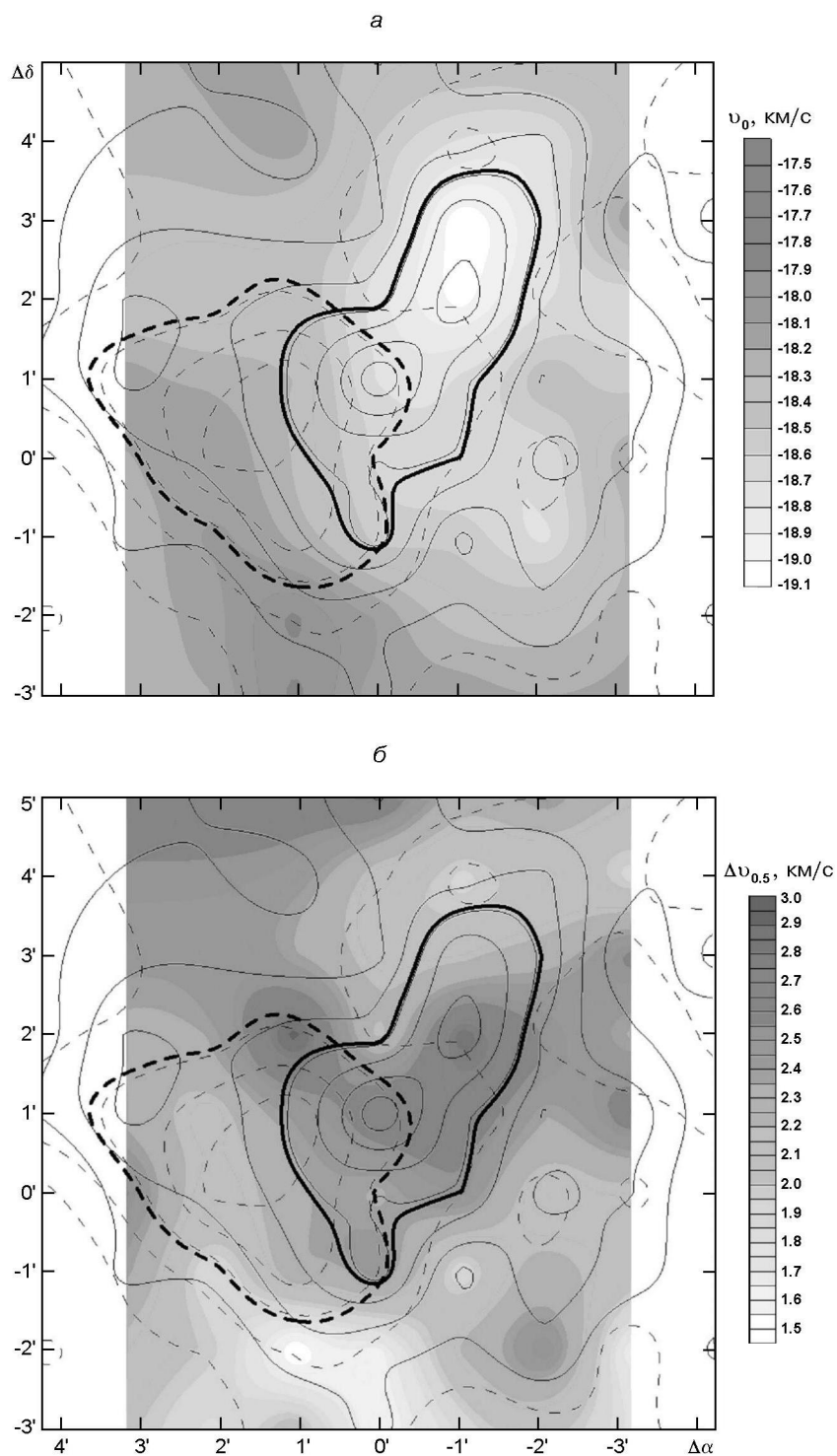


Рис. 2. Карта области IRAS 05345+3157 в линии  $J=1-0$   $^{13}\text{CO}$ . Интегральные интенсивности красносмещенной и синесмещенной части молекулярного облака показаны пунктиром и сплошной линиями соответственно. Тонкие линии — уровни интенсивности, проведенные через каждые 1 К км/с, начиная с уровня 1 К км/с. Толстые линии — контуры на уровне 0.5 от максимальных значений. Серым цветом показано распределение центральной скорости (а) и ширины линии (б) на уровне 0.5, полученных из аппроксимации наблюдаемых спектров функцией Гаусса

ся как проявление биполярного потока. Для определения физических параметров биполярного потока был разработан специальный метод, который описан ниже.

### СТАЦИОНАРНОЕ ОБЛАКО

В стационарном облаке только с микротурбулентным движением вещества распределение количества молекул по скоростям описывается функцией Гаусса с центральной скоростью  $v_0$  и шириной на уровне  $0.5$ . Предполагается, что вещество в биполярном потоке и в стационарном облаке находится в состоянии локального термодинамического равновесия с температурой возбуждения  $T_{ex}$ . В этом случае яркостная температура, излучаемая стационарным облаком на скорости  $v$  в точке с координатами  $(x, y, z)$  будет равна

$$T_{mb}^s(x, y, z, v) = [J(T_{ex}) - J(T_{bg})](1 - \exp(-\tau)), \quad (1)$$

где

$$\tau = \exp(-4 \ln(2) \frac{v^2}{v_0^2}) \tau_0,$$

$$J(T) = \frac{529}{\exp(529/T) - 1}.$$

Здесь  $\tau_0$  — оптическая толщина стационарного облака в направлении  $x$  и  $y$  в центре линии. Все величины записаны для перехода  $J = 1-0$  молекулы  $^{13}\text{CO}$ . В данном выражении не используется предположение о малых значениях оптической толщины, так как в центре профиля линии  $J = 1-0$  молекулы  $^{13}\text{CO}$  оптическая толщина порядка единицы. Излучение стационарного облака дает вклад в излучение, выходящее из молекулярного облака в любой точке. Параметры движения вещества  $v_0$  и  $\tau_0$  постоянны и не зависят от  $x$  и  $y$ . При этом величина  $\tau_0$  определяется плотностью частиц и размерами облака на луче зрения для каждой  $x$  и  $y$ .

### МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НИЗКОСКОРОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНОГО ПОТОКА

Метод предназначен для расчета массы, импульса, энергии биполярного потока при малых скоростях его движения. С их помощью можно при необходимости рассчитать и другие параметры (светимость, скорость потери массы и т. д. [3]).

При разработке метода учитывались следующие условия.

1. МНСБП должен давать оценки нижнего предела физических параметров биполярного потока.

2. Вклад микротурбулентного движения облака в расчет физических параметров биполярного потока должен быть сведен к минимуму.

Основная идея метода заключается в следующем. По параметрам линии излучения отдельно определяется масса молекулярного облака и масса стационарного облака. Разность между этими массами считается массой биполярного потока. Аналогичным способом определяются импульс и энергия биполярного потока. В данной работе рассматривается применение МНСБП к анализу спектральной линии  $J = 1-0$  молекулы  $^{13}\text{CO}$ , но метод может быть легко модифицирован для анализа других спектральных линий вращательных переходов молекулы  $^{13}\text{CO}$ .

Ниже описаны конкретные этапы расчета с использованием МНСБП.

1. Построение карт интегральных интенсивностей красномещенной и синемещенной частей молекулярного облака.

2. Определение параметров стационарного облака. Выбираются позиции, лежащие в стороне от биполярного потока. Излучение из этих областей в нашем приближении соответствует излучению стационарного облака. Профили линий на этих позициях аппроксимируются функцией (1) методом наименьших квадратов и находятся значения  $s$ ,  $s_0$  и  $r$ . Усредненные по этим позициям величины  $s$ ,  $s_0$  и  $r$  считаются параметрами стационарного облака.

3. Выбор диапазонов скоростей. Верхним пределом скорости синемещенного компонента потока считается величина  $b = s_0 + s/2$ . Нижним пределом скорости красномещенного компонента потока считается величина  $r = s_0 - s/2$ . При уменьшении  $r$  и увеличении  $b$  рассчитанные параметры биполярного потока будут увеличиваться, но одновременно будет возрастать вклад шумов, которые имеются в наблюдательных данных. Увеличение  $r$  и уменьшение  $b$  приводит к недооценке параметров биполярного потока.

4. Расчет яркостной температуры стационарного облака для всех позиций  $s$  и  $s_0$ . Яркостная температура  $T_{mb}^s(s, s_0, r)$  стационарного облака в направлении  $s$  определяется формулой (1). Величины  $s_0$  и  $r$  известны. Величину  $s$  нельзя определить непосредственно так, как это было сделано в п. 2, поскольку излучение биполярного потока влияет на наблюдаемый профиль линии. Для определения  $s$  вводится следующее приближение. В диапазоне скоростей  $b \dots r$  влияние биполярного потока предполагается незначительным. Следовательно, яркостная температура в этом диапазоне скоростей описывается выражением (1) для любых  $s$  и  $s_0$ . Тогда, поскольку  $s$  прямо пропорциональна лучевой плотности молекул  $^{13}\text{CO}$ ,

$$s = \frac{N[T_{mb}(s, s_0, r), b, r]}{N[T_{mb}(s, s_0, r), b, r]}, \quad (2)$$

где

$$N(T, \theta_{\min}, \theta_{\max}) = \frac{2.42 \cdot 10^{14} (T_{ex} - 0.88)^{\max}}{1 - \exp(-5.29/T_{ex})} (T) d, \quad (3)$$

$$(T) = \ln 1 + \frac{T}{5.29 / [\exp(5.29/T_{ex}) - 1] - 0.87}. \quad (4)$$

Здесь  $T_{mb}(\theta, \theta)$  — наблюдаемая яркостная температура на лучевой скорости на позиции с координатами  $\theta$  и  $\theta$ ,  $N(T, \theta_{\min}, \theta_{\max})$  — функция, определяющая лучевую плотность молекул  $^{13}\text{CO}$  в диапазоне лучевых скоростей  $\theta_{\min} \dots \theta_{\max}$ , находящихся в состоянии термодинамического равновесия с температурой возбуждения  $T_{ex}$ , излучение которых описывается яркостной температурой  $T$  [2]. При применении формулы (2) к наблюдательным данным в некоторых случаях в определенных диапазонах лучевых скоростей рассчитанный профиль линии стационарного облака превышал профиль линии молекулярного облака. В этих случаях рассчитанная оптическая толщина  $\tau$  уменьшалась до тех пор, пока не выполнялись условия

$$\frac{T_{mb}^{bo} d}{b - b_1} = T_{mb} \quad \text{и} \quad \frac{T_{mb}^{bo} d}{r_1 - r} = T_{mb}$$

где  $b_1$  — нижний предел скорости синей части потока,  $r_1$  — верхний предел скорости красной части потока,  $T_{mb}$  — среднее квадратичное отклонение наблюдаемой яркостной температуры, величина  $T_{mb}^{bo}$  описана ниже.

5. Расчет физических параметров биполярного потока. Для синего и красного компонентов потока по формулам (3) и (4) рассчитываются лучевые плотности молекул  $^{13}\text{CO}$ . Для стационарного облака на позиции с координатами  $\theta$  и  $\theta$  эти плотности определяются функциями  $N(T_{mb}^s(\theta, \theta, \theta, \theta), b_1, b)$  и  $N(T_{mb}^s(\theta, \theta, \theta, \theta), r, r_1)$ , где  $\theta$  определяется способом, описанным в предыдущем пункте. Для молекулярного облака лучевые плотности записываются аналогично  $N(T_{mb}(\theta, \theta), b_1, b)$  и  $N(T_{mb}(\theta, \theta), r, r_1)$ . Расчеты массы, импульса и энергии по известным лучевым плотностям проводились согласно методике, описанной в работе [14]. Разность между массами молекулярного облака и стационарного облака считалась массой биполярного потока. Аналогичным образом определяются импульс и энергия биполярного потока.

Поскольку оптическая толщина прямо пропорциональна рассчитанной массе, оптическая толщина биполярного потока, взятая в спектральном канале, равна разности оптических толщин молекулярного облака и стационарного облака в данном канале. Это дает возможность определить яркостную температуру потока в каждом спектральном канале на каждой позиции с координатами  $\theta$  и  $\theta$ :



$$T_{mb}^{bo}(\alpha, \delta) = [J(T_{ex}) - J(T_{bg})] \cdot [1 - \exp(-\tau(T_{mb}(\alpha, \delta) + T_{mb}^s(\alpha^s, \delta^s, \delta_0^s, \delta^s)))]. \quad (5)$$

Таким образом, по этому методу были получены профили линий биполярного потока. Отношение сигнал/шум в максимумах этих профилей этих линий достигало 5.

### ПАРАМЕТРЫ БИПОЛЯРНОГО ПОТОКА В ОБЛАСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ IRAS 05345+3157

Вышеописанный метод был применен для расчета физических параметров низкоскоростной части биполярного потока в области IRAS 05345+3157. На рис. 3 в четырех точках молекулярного облака черной линией показаны наблюдаемые профили линий излучения  $^{13}\text{CO}$  ( $J = 1-0$ ), серой линией показаны рассчитанные по формуле (1) профили линий стационарного облака, пунктиром изображены профили линий излучения биполярного потока, полученные с использованием описанного выше метода (формула (5)). Относительные координаты каждой точки  $\alpha$  и  $\delta$  в угловых минутах дуги указаны в левом верхнем углу каждого графика. Позиции  $(0.53, 1)$  и  $(-0.53, 1.5)$  соответствуют максимумам красносмещенного и синесмещенного компонента биполярного потока соответственно. Позиция  $(0.53, 0)$  расположена вблизи центра биполярного потока, позиция  $(2.12, 3)$  — на краю молекулярного облака, вне зоны биполярного потока. Из рис. 3 видно, что хо-

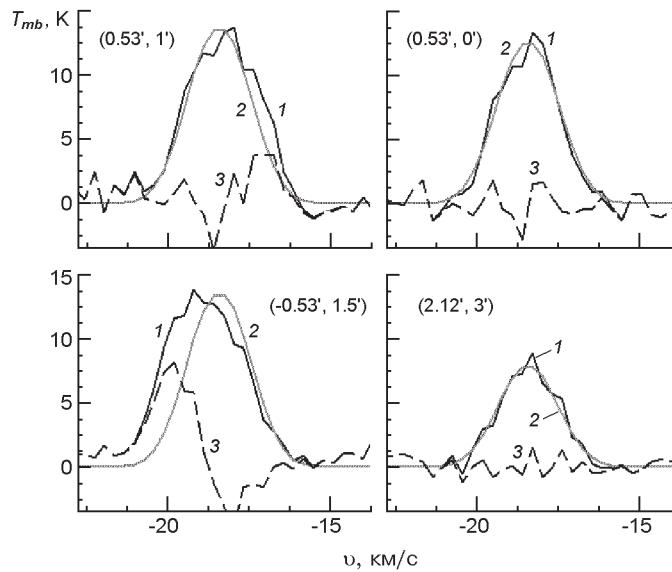


Рис. 3. Профили линий  $J = 1-0$  молекулы  $^{13}\text{CO}$ , соответствующие молекулярному облаку (линия 1), стационарному облаку (2) и биполярному потоку (3) полученные для различных точек. Вверху указаны относительные координаты  $\alpha$  и  $\delta$  каждой точки

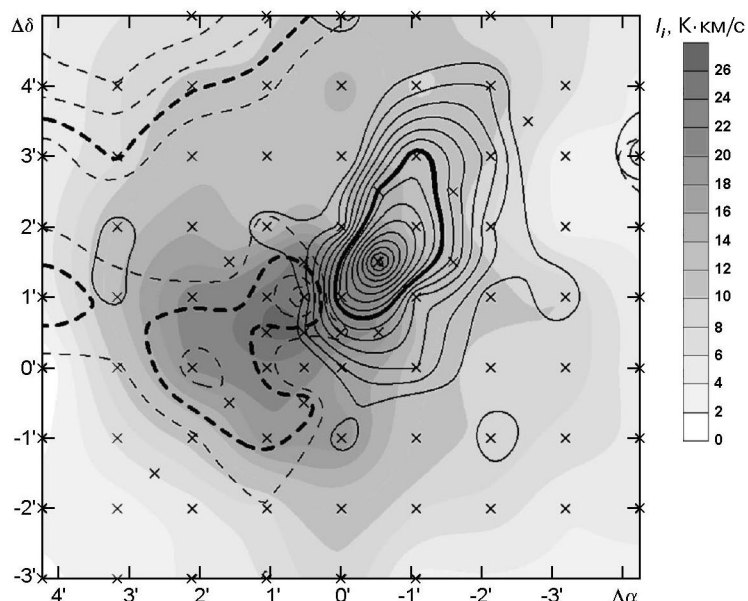


Рис. 4. Карта распределения красномещенного (пунктирная линия) и синесмещенного (сплошная линия) компонентов биполярного потока в области IRAS 05345+3157 в линии  $J = 1-0$  молекулы  $^{13}\text{CO}$ . Крестиками показаны позиции, на которых проводились наблюдения. Тонкие линии — уровни интенсивности, проведенные через каждые 1 К км/с, начиная с уровня 1 К км/с. Толстые линии — контуры на уровне 0.5 от максимальных значений. Фонovým серым цветом показано распределение рассчитанной интегральной интенсивности стационарного облака

рошее совпадение профилей линий молекулярного облака и профилей линий стационарного облака наблюдается как на краю, так и в центральных областях молекулярного облака вне зоны распространения биполярного потока. В областях, где наблюдается биполярный поток, профили существенно отличаются. Это свидетельствует о том, что МНСБП эффективно выделяет микротурбулентную составляющую движения в молекулярном облаке и может использоваться для определения параметров биполярного потока.

Карты распределения рассчитанных интегральных интенсивностей красномещенного и синесмещенного компонентов биполярного потока показаны на рис. 4 пунктиром и сплошной линиями соответственно. Серым цветом показано распределение рассчитанной интегральной интенсивности стационарного облака.

При расчетах параметров биполярного потока температура возбуждения  $T_{ex}$  полагалась равной яркостной температуре в центре профиля линии молекулы  $^{12}\text{CO}$  [14]. Для данного облака  $T_{ex} = 33$  К. Отношение концентраций молекул  $\text{H}_2$  и  $^{13}\text{CO}$  полагалось равным  $5 \cdot 10^5$  [4]. При расчетах не делалась коррекция на угол наклона между осью потока и лучом зрения. В таблице приведены основные параметры биполярного потока, полученные в данной работе по наблюдениям молекулы  $^{13}\text{CO}$  методом МНСБП и аналогичные параметры, полученные в других исследованиях по наблюдениям молекулы  $^{12}\text{CO}$ . Во всех

**Параметры биполярного потока (скорости  $v_r$ ,  $v_b$ , масса  $M$ , импульс  $P$  и энергия  $E$ ) в области звездообразования IRAS 05345+3157**

Молекула	$J$	$v_r$ , км/с	$v_b$ , км/с	$M$ , $M_\odot$	$P$ , $M_\odot \cdot \text{км/с}$	$E$ , $10^{38}$ Дж	Литературный источник
$^{13}\text{CO}$	1-0	17.4 ... -16.5	-21... -19.5	368	547	8.4	Данная работа
$^{12}\text{CO}$	1-0	-15...-5	-30...-22	7.6	37.1	2	[11]
$^{12}\text{CO}$	2-1	—	—	6.1	38.3	3.7	[14]

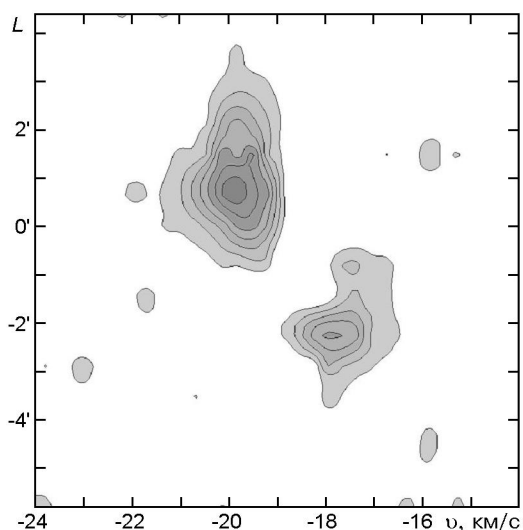
случаях рассчитывался нижний предел параметров биполярного потока. Символами  $v_r$ ,  $v_b$  обозначены диапазоны лучевых скоростей, в которых проводился анализ биполярного потока. При расчетах не учитывался вклад северо-восточной части молекулярного облака, которая имеет повышенную интенсивность излучения в красномощенной области (рис. 4). Полагалось, что эта часть облака не имеет отношения к исследуемому биполярному потоку.

Биполярный поток в линии молекулы  $^{13}\text{CO}$  ( $J = 1-0$ ) имеет протяженную форму, вытянутую в направлении с юго-востока на северо-запад. Красномощенная часть потока расположена в юго-восточной части молекулярного облака, синесмещенная — в северо-западной. Сравнение карт биполярного потока с картой распределения массы стационарного облака показывает, что красномощенная часть биполярного потока распространяется в плотных слоях молекулярного облака, в то время как существенная часть синесмещенной части биполярного потока распространяется в гораздо менее плотных слоях молекулярного облака.

В работах [11, 14] найдено, что биполярный поток в линиях  $J = 1-0$  и  $J = 2-1$  молекулы  $^{12}\text{CO}$  имеет протяженную форму, вытянутую в направлении запад — восток. Сравнение этих данных с нашими показывает, что положения красномощенных компонентов высокоскоростной (данные линий молекулы  $^{12}\text{CO}$ ) и низкоскоростной (данные линии молекулы  $^{13}\text{CO}$ ) части биполярного потока практически совпадают. Значительная доля синесмещенных компонентов высокоскоростной и низкоскоростной части биполярного потока оказываются пространственно разнесенными. Наблюдения на радиоинтерферометре SMA [6] небольшой области ( $70'' \times 70''$ ) вблизи точки образования биполярного потока подтверждают это вывод.

На рис. 5 приведена диаграмма «позиция — скорость» для области звездообразования IRAS 05345+3157 измеренная в направлении юго-восток — северо-запад (по оси биполярного потока) с центром в точке с координатами (0, 1). Диаграмма построена по рассчитанным профилям линий, соответствующим биполярному потоку. В целом диаграмма на рис. 5 имеет вид, характерный для биполярных потоков. Основным отличием данной диаграммы от аналогичных диаграмм, построенных по профилям линий молекулы  $^{12}\text{CO}$ , является отсутствие

Рис. 5. Диаграмма позиция — скорость для области звездообразования IRAS 05345+3157, измеренная в направлении юго-восток — северо-запад с центром в точке с координатами (0, 1). Контуры проведены по уровням  $T_{mb}^{bo}$ , начиная с 1 К с шагом 1 К



излучения на скоростях вблизи центральной скорости стационарного облака  $s_0$ , которое определяется микротурбулентным движением. Это является следствием применения метода МНСБП. Поскольку МНСБП дает оценки нижнего предела физических параметров биполярного потока, подавляющая часть излучения вблизи лучевой скорости  $s_0$  считается излучением стационарного облака и отсутствует в профилях биполярного потока. Исключение микротурбулентного движения позволило четче выделить биполярность потока.

Сравнение параметров биполярного потока в линиях молекул  $^{12}\text{CO}$  и  $^{13}\text{CO}$  показывает, что масса низкоскоростной части биполярного потока, определенная по линии молекулы  $^{13}\text{CO}$  ( $J = 1-0$ ), намного больше массы, определенной по наблюдениям линий молекулы  $^{12}\text{CO}$  (высокоскоростная часть биполярного потока). Это относится и к импульсу, и к энергии биполярного потока, хотя здесь разница существенно меньше. Отсюда можно сделать вывод, что вклад низкоскоростной части биполярного потока является определяющим при оценке его параметров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено картографирование области звездообразования большой массы IRAS 05345+3157 в линии молекулы  $^{13}\text{CO}$  на частоте 110.2 ГГц (переход  $J = 1-0$ ). Разработан метод определения массы, импульса и энергии низкоскоростной части биполярного потока, основанный на анализе результатов наблюдений спектральных линий вращательных переходов молекулы  $^{13}\text{CO}$ . Проведен анализ низкоскоростной части биполярного потока в области звездообразования IRAS 05345+3157 в линии молекулы  $J = 1-0$   $^{13}\text{CO}$  и определены его основные параметры. Наши результаты показывают, что основная масса биполярного пото-

ка движется с небольшой скоростью. Высокоскоростные потоки вещества вносят меньший вклад в энергию кинетического движения вещества в биполярных потоках.

1. *Антюфеев А., Шулга В.* Спектроанализатор на базе персонального компьютера // Радиотехника.—2005.—№ 10.—С. 145—148.
2. *Arce H., Goodman A.* The episodic, precessing giant molecular outflow from IRAS 04239+2436 (HH 300) // *Astrophys. J.* 2001. **554**.—P. 132—151.
3. *Cabrit S., Bertout C.* CO line formation in bipolar flows. II - Decelerated outflow case and summary of results // *Astrophys. J.*—1990.—**348**.—P. 530—541.
4. *Dickman R.* The ratio of carbon monoxide to molecular hydrogen in interstellar dark clouds // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1978.—**37**.—P. 407—427.
5. *Fontani F., Caselli P., Bourke T., et al.* Highly deuterated pre-stellar cores in a high-mass star formation region // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**477**.—P. 45—48.
6. *Fontani F., Zhang Q., Caselli P., et al.* Linking pre- and proto-stellar objects in the intermediate-/high-mass star forming region IRAS 05345+3157 // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**499**.—P. 233—247.
7. *Kutner M., Ulich B.* Recommendations for calibration of millimeter-wavelength spectral line data // *Astrophys. J.*—1981.—**250**.—P. 341—348.
8. *Molinari S., Testi L., Rodriguez L., et al.* The formation of massive stars. I. High-resolution millimeter and radio studies of high-mass protostellar candidates // *Astrophys. J.*—2002.—**570**.—P. 758—778.
9. *Piddyachiy V. I., Shulga V. M., Korolev A. M., et al.* High doping density Schottky diodes in the 3mm wavelength cryogenic heterodyne receiver // *Int. J. Infrared Millimeter Waves.*—2005.—**26**, N 9.—P. 1307—1315.
10. *Ridge N., Moore T.* A single distance sample of molecular outflows from high-mass young stellar objects // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**378**.—P. 495—508.
11. *Snell R., Huang Y., Dickman R., et al.* Molecular outflows associated with bright far-infrared sources // *Astrophys. J.*—1988.—**325**.—P. 853—863.
12. *Torrelles J., Eiroa C., Mauersberger R., et al.* The molecular core in the AFGL 5157 region // *Astrophys. J.*—1992.—**384**.—P. 528—535.
13. *Torrelles J., Gomez J., Anglada G., et al.* The powering sources of the molecular outflows in the AFGL 437, AFGL 5142, and AFGL 5157 regions // *Astrophys. J.*—1992.—**392**.—P. 616—621.
14. *Zhang Q., Hunter T., Brand J., et al.* Search for CO outflows toward a sample of 69 high-mass protostellar candidates. II. Outflow properties // *Astrophys. J.*—2005.—**625**.—P. 864—882.

Поступила в редакцию 02.08.10