НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Антюфеев Александр Валерьевич

УДК 524.6-77

БИПОЛЯРНЫЕ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ПОТОКИ В ОБЛАСТЯХ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 И G122.0-7.1

01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель Шульга Валерий Михайлович, академик НАН Украины, доктор физико-математических наук, профессор

Харьков – 2015

Содержание

Список сокращений	4
Введение	5
РАЗДЕЛ 1. БИПОЛЯРНЫЕ ПОТОКИ В	
МОЛОДЫХ ЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТАХ.	15
1.1. Биполярные потоки	15
1.2. Биполярные молекулярные потоки	17
1.3. Высокоскоростная часть молекулярных потоков	18
1.4. Молекулярные потоки от маломассивных протозвезд	19
1.5. Молекулярные потоки от высокомассивных протозвезд	20
1.6. Низкоскоростная часть молекулярных потоков	21
1.7. Воздействие потока на родительское молекулярное облако	22
1.8. Методы определения параметров высокоскоростной части потоков	23
1.9. Методы определения параметров низкоскоростных части потоков	25
Выводы к разделу 1	26
РАЗДЕЛ 2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА СПЕКТРАЛЬНЫХ	
НАБЛЮДЕНИЙ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РТ-22	28
2.1. Приемный комплекс для астрономических наблюдения в диапазоне	
частот 85115 ГГц на радиотелескопе РТ-22 КрАО	29
2.1.1. Режимы работы аппаратурного комплекса	31
2.1.2. Калибровка	38
2.1.3. Криогенный приемник миллиметрового диапазона длин волн	39
2.1.4. Фильтровый анализатор спектра	41
2.1.5. Фурье-спектроанализатор	41
2.1.6. Система управления и сбора данных	57
2.2. Характеристики РТ-22 в 3-х миллиметровом диапазоне длин волн	59
2.2.1. Определение параметров РТ-22 на частоте 87.7 ГГц	60
2.2.2. Определение параметров РТ-22 на частоте	
излучения молекулы ¹³ СО (J=1-0)	68
Выводы к разделу 2	69
РАЗДЕЛ З. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ	
БИПОЛЯРНЫХ ПОТОКОВ	70
3.1. Метод определения низкоскоростных параметров	
биполярного потока (МНСБП)	71
3.1.1. Исходные предположения	71
3.1.2. Алгоритм метода определения низкоскоростных параметров	
биполярного потока	72
3.2. Модифицированный метод расчета параметров низкоскоростной	
части биполярных потоков молодых звездных объектах	77
3.2.1. Алгоритм модернизированного метода расчета параметров	
низкоскоростной части биполярных потоков	78
3.2.2. Погрешность определения массы и энергии биполярного потока	
ASO1 в объекте G122.0-7.1, вызванная наличием шумов в	
экспериментальных спектрах	89

Выводы к разделу 3	92
РАЗДЕЛ 4. БИПОЛЯРНЫЕ ПОТОКИ В МОЛОДЫХ ЗВЕЗДНЫХ	
ОБЪЕКТАХ	93
4.1. Биполярный поток в области звездообразования IRAS 05345+3157	93
4.1.1. Наблюдения	94
4.1.2. Характер движения вещества в области IRAS 05345+3157	95
4.1.3. Параметры биполярного потока в области звездообразования	
IRAS 05345+3157	97
4.2. Биполярное движение молекулярного вещества в области	
звездообразования IRAS 22267+6244	. 101
4.2.1. Наблюдения	. 101
4.2.2. Расчет параметров биполярного потока	. 102
4.2.3. Обсуждение результатов	. 103
4.3. Биполярные потоки в области массивного звездообразования	
G122.0-7.1 в линиях молекул ¹² CO(J=1-0) и ¹³ CO (J=1-0)	. 109
4.3.1. Наблюдения	. 110
4.3.2. Результаты картографирования области звездообразования	
G122.0-7.1 в линиях молекул ¹² СО и ¹³ СО	. 111
4.3.3. Биполярный поток в источнике ASO1 в линии ¹² CO (J=1-0)	. 113
4.3.4. Биполярный поток в источниках ASO1 и ASO2	
в линии ¹³ CO (J=1-0)	116
4.3.5. Обсуждение	. 119
Выводы к разделу 4	. 121
ВЫВОДЫ	. 123
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	. 128

Список сокращений

МЗО – молодой звездный объект

ЛТР – локальное термодинамическое равновесие

СУСД – система управления и сбора данных

КИДН – коэффициент использования диаграммы направленности антенны

МНСБП – метод расчета параметров низкоскоростной части биполярных

потоков

введение

Биполярные потоки в молодых звездных объектах являются важной частью процесса звездообразования. Считается, что все формирующиеся звезды при аккреции вещества проходят через стадию, при которой молодой звездный объект выбрасывает в окружающее пространство значительную его часть, образуя два, направленных в противоположные стороны потока. Эти потоки назвали биполярными потоками. Потоки являются основным механизмом, который уносит вещество родительского молекулярного облака из области формирования молодой звезды и избавляет ее от существенной части момента движения. Процесс уноса вещества во многом определяет массу будущей звезды. Биполярные потоки также влияют и на родительское молекулярное облако за пределами плотного ядра. Потоки от маломассивных протозвезд увеличивают ширину спектральных линий газовой составляющей молекулярных облаков [1], а высокомассивные протозвезды создают такие мощные потоки, которые сметают огромные массы вещества и обладают энергией, способной рассеять родительское облако [2]. Биполярные потоки в молодых звездных объектах являются одним из важнейших признаков звездообразования и интенсивно исследуются методами современной радиоастрономии. Ежегодно печати появляются В десятки статей, посвященных этой тематике. Биполярные потоки состоят из нескольких компонент – молекулярной составляющей, ионизированного газа, пыли. Молекулярная составляющая является наиболее информативной ЛЛЯ исследований, поскольку наблюдение спектров излучения молекул позволяет получить данные как о количестве вещества в потоке, так и о скорости его движения в потоке. В дальнейшем в данной работе под биполярным потоком понимается молекулярная составляющая потока.

Активное изучение биполярных потоков началось около 30 лет назад с развитием радиоастрономии. К настоящему времени собрано большое

наблюдательных определены количество данных, параметры многих биполярных [3-6], потоков разработана классификация потоков, характеризующая их эволюцию [7]. Разработано значительное количество моделей, призванных объяснить механизм образования биполярных потоков [88, 9] и особенности распространения потока в молекулярном облаке [10-17]. В работе [18] собраны данные об 391 потоке, наблюдаемых в молодых звездных объектах.

Развитие методов радиоастрономии предоставляет достаточно обширные возможности для наблюдений биполярных потоков. Наибольшее информации миллиметровом количество получено В диапазоне С использованием одиночных телескопов. Именно В ЭТОМ диапазоне происходит излучение наиболее распространенных во Вселенной молекул. Наблюдения на одиночных телескопах позволяют выяснить существование биполярных потоков, на них возложен поиск областей звездообразования, пространственных определение ИХ размеров И изучение процессов взаимодействия биполярных потоков с родительским облаком. В настоящее используется радиоинтерферометрические время все чаще методы наблюдений [19, 20]. Интерферометры имеют на порядок меньшую ширину диаграммы направленности, что позволяет исследовать внутреннюю структуру потоков, в особенности вблизи центра аккреции. Введение в строй новых радиотелескопов открывает новые возможности. Например, большая ALMA возможность наблюдать чувствительность телескопа дает молекулярный поток в гораздо большем интервале скоростей, чем предыдущие наблюдения, что приводит к увеличению диапазона изучаемых значений импульса и энергии потока [20]. Современные телескопы позволяют также исследовать молекулярные потоки в терагерцном диапазоне частот в линиях молекул на вращательных переходах с высокими значениями вращательного квантового числа J [21]. Продолжается поиск новых потоков [22]. Накопление наблюдательных данных привело к появлению работ, в которых одновременно анализируются параметры многих потоков и таким образом проводятся статистические исследования свойств биполярных потоков. [18, 23].

Актуальность темы.

В биполярных потоках в молодых звездных объектах можно выделить низкоскоростную и высокоскоростную части. В данной работе под низкоскоростной частью понимается та часть потока, которая излучает в той же области спектра, где присутствует излучение неподвижной части облака (стационарной облака). Таким образом, эта часть потока излучает в диапазоне скоростей, который лежит вблизи скорости движения неподвижной части облака.

Высокоскоростная часть биполярных потоков, как правило, изучается по наблюдениям молекулы ¹²СО. В работах [24-30] приведены результаты наблюдений, расчеты величин массы, энергии и других параметров биполярных потоков. Вследствие относительно большой распространенности молекулярных облаках ¹²СО является одной из наиболее часто В наблюдаемых молекул. Именно ее наблюдения позволили открыть биполярные потоки. Но в то же время, оптическая толщина в центре профиля линий молекулы ¹²CO очень велика и это ограничивает ее применение для исследований плотных молекулярных облаков. Поэтому для изучения биполярных потоков используются области линии излучения вдали от её центра (крылья линии), где оптическая толщина линии молекулы ¹²СО невелика.

Для исследования низкоскоростной части биполярного потока используется излучение линий ¹³CO, CS, C¹⁸O и других молекул, у которых оптическая толщина гораздо меньше, чем у молекулы ¹²CO [35]. Низкоскоростная часть намного менее исследована, чем высокоскоростная. Число работ, посвященных изучению низкоскоростной часть биполярного потока заметно меньше, чем число аналогичных исследований, где биполярный поток исследуется по излучению молекулы ¹²CO, а работы, в которых проводятся статистические исследования низкоскоростной части

биполярных потоков - отсутствуют. Вместе с тем известно, что отсутствие данных о низкоскоростной части биполярного потока приводит к существенной недооценке основных характеристик биполярных потоков. Например, в работе [2] было указано, что масса низкоскоростной части может в 10 раз превышает массу его высокоскоростной части.

B большинстве наблюдаемых излучения случаев В спектрах низкоскоростная часть биполярных потоков проявляется в асимметрии профилей линий, появлении крыльев линий. Однако, В некоторых источниках наблюдается систематический сдвиг всего профиля линии вдоль направления движения вещества [34, 35]. Это явление можно использовать потока. ДЛЯ изучения низкоскоростных частей Например, учет систематического сдвига при расчете параметров потока приводит к существенному увеличению рассчитываемых параметров потока [35]. При возрастает точность этом автоматически определения вклада низкоскоростных компонент в общие параметры потока. Сдвиг линии излучения является наименее исследованным явлением, хотя он проявляется в наименее низкоскоростной части потока и ответственен за перенос значительных масс вещества. Недостаточно как наблюдательных данных, так и методов расчета параметров низкоскоростной части биполярных потоков.

При изучении низкоскоростных движений биполярных потоков проблема заключается в том, что в этом диапазоне лучевых скоростей кроме движения, связанного с биполярностью, присутствует также излучение окружающего родительского облака и необходимы методы их разделения. Анализ литературы показал, что большинство опубликованных методов расчета параметров низкоскоростной части биполярных потоков не предназначены для учета систематического сдвига всего профиля линии [31-34]. В методе, описанном в работе [35], введено предположение о симметричности стационарного облака относительно центра потока. Это предположение может не выполняться для массивных молодых звездных объектов, в особенности в периферийных областях биполярного потока. В диссертационной работе исследуется низкоскоростная часть потоков с учетом систематического сдвига всего профиля линии вдоль направления движения вещества. Таким образом, актуальность тематики работы определяется тем, что она посвящена малоизученной низкоскоростной части биполярных потоков, которая ответственна за перенос основной массы потока, и исключение ее из расчетов приводит к существенной недооценке параметров потока.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

рамках Диссертация выполнялась В исследований отдела миллиметровой Радиоастрономического радиоастрономии института Национальной академии наук Украины в соответствии с госбюджетными НИР: "Дослідження в галузі міліметрової радіоастрономії. Створення і розвиток інструментальної бази." (№ гос. регистрации 0100U006425), "Спектральні дослідження областей активного зореутворення В міліметровому та сантиметровому діапазонах." (№ гос. регистрации 0101U007269), "Дослідження місць активного зіркоутворення ПО молекулярним лініям випромінювання. Розвиток інструментальної бази радіоастрономічних досліджень." (№ гос. регистрации 0103U007920), "Багаточастотні спектральні та РНДБ дослідження місць активного зіркоутворення. Розвиток інструментальної бази досліджень випромінювання молекул в молекулярних хмарах Галактики та в атмосфері Землі." (№ гос. регистрации 0107U000027), "Дослідження космічної речовини методами багатохвильової радіоспектроскопії." (№ гос. регистрации 0107U001043), "Дослідження кінематики та просторового розподілу молекулярної речовини В місцях активного зіркоутворення та атмосфері Землі методами мікрохвильової радіоастрономії. Розробка фізичних принципів створення радіофізичних приймальних систем нового покоління." (№ гос. регистрации 0112U000035).

Цель и задачи исследования.

Целью работы является определение основных характеристик биполярных потоков в массивных областях звездообразования с учетом их низкоскоростных компонентов. Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи

- Поиск и наблюдение областей звездообразования, в которых наблюдается явления сдвига линии излучения.
- Разработка методов анализа для определения кинетических характеристик биполярных потоков с учетом низкоскоростных компонентов движения молекулярного вещество. Создание компьютерных программ для их расчета с учетом систематического сдвига линий излучения.
- Определение параметров низкоскоростной части биполярных потоков и кинетических характеристик биполярных потоков в объектах, где наблюдается сдвиг линий.
- Оснащение радиотелескопа РТ-22 (пос. Кацивели, Крым) приемным комплексом миллиметрового диапазона (на частоты от 85 до 115 ГГц) для проведения спектральних исследований. В рамках этой работы соискателю были поставлены задачи: разработка и изготовление Фурье-спектроанализатора и разработка программного обеспечения для управления антенной РТ-22 и приемным комплексом.
- Определение параметров антенны РТ-22 на частотах наблюдаемых молекулярных линий

Объект исследования – биполярные потоки в областях образования молодых звезд.

Предмет исследования – низкоскоростная часть молекулярной составляющей биполярных потоков в областях звездообразования.

Методы исследования

Для определения характеристик биполярных молекулярных потоков использовались спектральные методы наблюдений излучения молекул в миллиметровом диапазоне длин волн. Наблюдения на радиотелескопе проводились в режиме «наведение-отвод» и режиме частотной модуляции. При разработке методов расчета параметров низкоскоростной части биполярных потоков использовался регрессионный анализ, элементы теории вероятностей и теории ошибок. При разработке Фурье-спектроанализатора использовались методы спектрального анализа, основанные на свойствах быстрого преобразования Фурье.

Научная и научно-техническая новизна полученных результатов

- области Впервые проведено картографирование массивной звездообразования IRAS 22267+6244 в линии молекулы ¹³CO (J=1-0). областей Картографирование массивных звездообразования IRAS 05345+3157 и G122.0-7.1 в линии молекулы ¹³CO (J=1-0) впервые проводились на большой площади небесной сферы, захватывающей всю область потока. Объект G122.0-7.1 дополнительно изучен в линии молекулы ¹²СО (J=1-0). Во всех этих объектах установлено наличие биполярных потоков, причем потоки проявляются не только в изменении формы профиля линии, но и как смещение всего профиля линии вдоль оси потока. В объекте G122.0-7.1 обнаружен ранее неизвестный кандидат в молодые звездные объекты.
- Предложен новый метод определения спектров излучения родительского облака и биполярных потоков, а также расчета низкоскоростной части. Метод учитывает параметров ИХ все проявления биполярного потока в спектрах молекулярных линий: крылья, асимметрию профилей и систематический сдвиг вещества вдоль оси потока. Возможность учета последнего является наиболее существенной, так как подавляющее большинство существующих

методов такой сдвиг не учитывают. Разработанный метод обладает большей универсальностью, чем ближайший аналогичный метод, приведенный в работе [35]. Отличие состоит в том, что в разработанном методе не выдвигается требования о симметричности стационарного облака относительно центра потока.

- Впервые найдены параметры и проведен анализ низкоскоростной части биполярных потоков IRAS 05345+3157, В источниках IRAS 22267+6244, G122.0-7.1. Показано, что массы низкоскоростной части потоков намного больше масс высокоскоростной части, а их Рассчитаны энергии сравнимы. соотношения между массами биполярных потоков и массами молекулярного облака. Показано, что отношение масс биполярных потоков к массам молекулярного облака может сильно меняться от объекта к объекту объекту (30 % в источнике G122.0-7.1, 76% в источнике IRAS 22267+6244).
- Наблюдения на радиотелескопе РТ-22 в 3-х миллиметровом диапазоне длин волн впервые проводились в режимах «наведение-отвод» и частотной модуляции. Применение этих режимов позволило сократить время наблюдения без потери чувствительности и проводить наблюдения протяженных объектов.
- Впервые определены параметры антенной системы радиотелескопа РТ-22 в высокочастотной части ее рабочего диапазона на частоте 110,2 ГГц.

Практическое значение полученных результатов.

Предложенный метод расчета параметров биполярных потоков отличается универсальностью и может использоваться для расчета параметров потоков во многих областях звездообразования. Метод может быть легко преобразован и применен для расчета параметров в линиях других молекул (например, CS или C¹⁸O). Это дает возможность

использовать его для расчета параметров ядер МЗО (молодых звездных объектов).

Найденные параметры низкоскоростной части биполярных потоков могут быть использованы при дальнейшем анализе областей звездообразования и разработке новых моделей биполярных потоков.

Установка приемного комплекса на радиотелескопе РТ-22 КрАО позволяет проводить регулярные радиоастрономические наблюдения в диапазоне частот 85...115 ГГц. Эти исследования являются одними из основных в деятельности Межведомственного центра коллективного пользования радиотелескопом РТ-22 НАН Украины и МОН Украины.

Личный вклад диссертанта.

Соискателем выполнены все наблюдения источников IRAS 05345+3157 [3637] и IRAS 22267+6244 [38, 39], а также часть наблюдений источника G122.0-7.1 [40]. Соискателем предложен и разработан метод расчета низкоскоростной части биполярных потоков и проведен анализ потоков в источниках IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244, G122.0-7.1 [36-41].

Соискатель выполнил все основные работы по разработке и изготовлению Фурье-спектроанализатора [42-45], а также разработал необходимое программное обеспечение.

При разработке и создании приемного комплекса 3-х миллиметрового диапазона длин волн [46-49], соискатель осуществлял разработку и изготовление отдельных блоков приемника, выполнял монтажные и юстировочные работы на радиотелескопе, а также разрабатывал программное обеспечение комплекса.

Соискатель использовал методику определения параметров антенной системы по наблюдению планет и осуществил расчеты параметров радиотелескопа РТ-22 [50, 51].

Апробация результатов диссертации.

Результаты работы по теме диссертации докладывались и обсуждались на семинарах миллиметровой радиоастрономии в Радиоастрономическом

институте НАН Украины, а также на следующих международных конференциях и симпозиумах:

- The Fourth International Kharkov Symposium "Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves" (Kharkov, 2001).
- 2-я Харьковская конференция молодых ученых (Харьков 2002).
- 13-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (Севастополь – 2003).
- 16-я международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь 2006).
- XXIV конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии» (Пущино 2007).
- 2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Sub-Millimeter Waves (Kharkov – 2010).
- 12-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and beyond: Asrtophysics, cosmology and gravitation, cosmomicrophisics, radioastronomy and astrobiology" (Odessa – 2012).

Публикации.

диссертации опубликованы в Основные результаты 16 научных работах, В 9 статьях украинских зарубежных том числе В В И 7 сборниках специализированных научных журналах и в докладов международных конференций.

РАЗДЕЛ 1.

БИПОЛЯРНЫЕ ПОТОКИ В МОЛОДЫХ ЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТАХ

В данном подразделе даны общие сведенья о молекулярных потоках, а также отдельно рассмотрены высокоскоростная и низкоскоростная части потоков. Показано, что низкоскоростная часть молекулярных потоков значительно менее исследована, чем высокоскоростная. Отдельно рассмотрены методы расчета высокоскоростной и низкоскоростной частей потока.

1.1. Биполярные потоки

Первые выводы о местах звездообразования были сделаны, исходя из наблюдений наиболее ярких звезд класса О и В [52]. Эти звезды находятся на главной последовательности такое короткое время, что не успевают покинуть места своего образования. Многие О- и В-звезды образуют группы, названные ОВ-ассоциациями. С развитием радиоастрономии, было показано, что ОВ-ассоциации образуются в гигантских молекулярных облаках. Эти облака состоят в основном из молекул водорода H₂. В небольших количествах присутствуют и другие молекулы (например, CO, CS, HCN), а также гелий.

Установлено, что процессы рождения звезд на определенных этапах их развития сопровождаются мощными потоками, которые уносят значительные массы вещества из мест звездообразования. Изучение явления потери массы молодых звезд началось с открытием объектов Хербига-Аро [53, 54], которые вскоре были сопоставлены со звездными ветрами [55]. Измерение собственного движения объектов Хербига-Аро подтвердило, что истечение вещества порождается новосформированными звездами [56]. Наблюдения в миллиметровом диапазоне длин волн выявили наличие широких крыльев линий в спектрах молекулы ¹²CO [57], а анализ карт показал, что структура потоков биполярна [58]. Впоследствии были проведены масштабные поиски биполярных потоков, в которых участвовали многие астрономы и составлены каталоги потоков [23, 25, 59]. В результате было показано, что биполярные потоки являются распространенным явлением, присущим многим молодым звездным объектам. Считается, что все МЗО в процессе эволюции проходят стадию потока [8]. Потоки являются через важным элементом В формировании молодых звезд и определяющим механизмом, который уносит вещество родительского молекулярного облака из области формирования молодой звезды и избавляет ее от существенной части момента количества движения.

Вещество, из которого состоят потоки – это ионизированный, молекулярный и атомарный газ. Потоки в молодых звездных объектах представляют собой мощное энергетическое явление, наблюдаемое в широком диапазоне длин волн от радиодиапазона до ультрафиолета [8]. Выделяют несколько объектов, связанных с биполярными потоками.

Одними из индикаторов движения вещества вблизи молодых звезд являются объекты Хербига-Аро (НН-объекты). Это небольшие туманности, расположенные вблизи молодых звездных объектов [60]. Эти объекты наблюдаются в оптическом диапазоне. Спектры НН-объектов представляют собой смесь линий колебательных переходов молекул водорода H₂, а также некоторых других элементов [OI], [SII], [NI], [FeII] и др. Источником излучения является взаимодействие сверхзвукового звездного ветра с окружающим веществом. Их размеры составляют обычно 500-1000 а.е.

Истечение вещества из молодых звезд проявляется также в форме оптических джетов. У большинства джетов видны обе биполярных части, у остальных только синесмещенная часть. Считается, что в этих случаях красносмещенная часть затенена молекулярным облаком. Размеры джетов – до 2 пк, скорость движения вещества составляет сотни километров в секунду [60]. Джеты характеризуются очень высокой степенью коллимации. Температура вещества в объектах Хербига-Аро и джетах — тысячи градусов Кельвина. Много джетов ассоциировано с молекулярными потоками (регистрируемые в линиях молекулы СО) [61, 62]. Наблюдения в источнике НН 111 показали, что джет пробивает узкий проход в окружающем молекулярном облаке [8].

Массивные потоки холодного газа в окрестности мест звездообразования были зарегистрированы при спектральных исследованиях в линиях молекулы ¹²СО и названы молекулярными потоками. Поскольку молекулярный компонент биполярных потоков составляет предмет исследований данной работы, далее он рассмотрен более подробно.

1.2. Биполярные молекулярные потоки

Температура молекулярных облаков составляет несколько десятков градусов Кельвинов [52]. Она настолько мала, что сами они не излучают электромагнитных волн в видимой части спектра. Пыль, содержащаяся в облаках, излучение, молекулярных поглощает видимое исходящее непосредственно от зарождающейся звезды. Эти обстоятельства долгое время препятствовали наблюдению областей звездообразования. При таких маленьких температурах молекулы могут излучать только на частотах, Поэтому наибольшее расположенных в радиодиапазоне. количество информации облаках 0 молекулярных получено средствами радиоастрономии в миллиметровом диапазоне частот. Молекула водорода симметрична, не имеет в этом диапазоне разрешенных переходов и, следовательно, не может наблюдаться напрямую. В миллиметровом диапазоне излучают несимметричные молекулы, такие как CO, CS и другие. На основании наблюдений этих молекул были получены основные данные о структуре областей звездообразования.

В молодых звездных объектах протозвездный ветер приводит в движение большие массы окружающего холодного газа [63]. Это приводит к

тому, что наблюдаемые линии вращательных переходов различных молекул деформируются и расширяются. Карты интенсивностей, построенные в различных диапазонах скоростей показывают, что красносмещенные и синесмещенные компоненты занимают различные пространственные области. Эту часть биполярных потоков называют молекулярными потоками.

Наиболее высокоскоростная часть молекулярных потоков изучается по излучению линий молекулы ¹²CO, низкоскоростная – по излучению линий менее распространенных молекул ¹³CO, CS и др. [35]. Наиболее полно исследована высокоскоростная часть потоков.

1.3. Высокоскоростная часть молекулярных потоков

Принято разделять потоки, порождаемые маломассивными протозвездами (с массами ~1 М и меньше) и высокомассивными протозвездами. Тем не менее, можно выделить основные тенденции, присущие потокам, как от маломассивных, так и от высокомассивных протозвезд. Масса, и механическая светимость потока коррелируют с болометрической светимостью [18]. Значительное количество высоко коллимированных потоков имеет линейную зависимость граничной скорости распространения потока от расстояния до центрального источника [63, 64]. Зависимость массы потока от скорости (относительно ядра) представляет собой функцию, состоящую из двух частей, каждая из которых носит степенной характер $M(\upsilon) \sim \upsilon^{\gamma}$ [63, 65]. Для более низких скоростей (менее 10 км/с) значения у лежит в диапазоне -0.5 ... -2.5, для более высоких для у характерны значения -2.5...-8 [66]. Совместные наблюдения линий ¹²СО и ¹³СО показали, что вещество в потоке не полностью заполняет луч телескопа. Это явление описывает коэффициент, который называется «фактор заполнения» (filling factor) [30]. Показано, что фактор заполнения в молекулярных потоках составляет ~0.1 на высоких скоростях в крыльях

линии и повышается до 1 при приближении к скорости неподвижного облака [67].

Потоки принято делить на потоки со стандартными скоростями (SHV потоки) и потоки с экстремальными скоростями (EHV потоки). SHV-потоки состоят из окружающего газа, сметенного протозвездным ветром. Эти потоки наблюдаются в молодых звездных объектах с различными массами и светимостями. Массы SHV потоков варьируются от сотых долей до сотен масс Солнца [4, 68]. Размеры SHV-потоков – от десятых до единиц парсек. Кинетическая энергия, переносимая потоками лежит в пределах 10⁴² ... 10⁴⁸ эрг [68, 30]. Эти потоки обладают невысоким фактором коллимации (отношение длины джета к его ширине) от 1 до 5.

1.4. Молекулярные потоки от маломассивных протозвезд

Молекулярные потоки от маломассивных протозвезд интенсивно изучались начиная с восьмидесятых годов [66]. Эти потоки имеют размеры 0.1-1 пк и распространяются со скоростями 10-100 км/с [69]. В этих потоках значения скорости изменения импульса имеют значения примерно 10^{-5} M_{\odot} км с⁻¹ год⁻¹, а скорость потери массы достигают $10^{-6} M_{\odot}$ год⁻¹.

Высококолиммированными потоками маломассивных звезд (молекулярные джеты) принято считать потоки, фактор коллимации которых лежит в пределах 3...20. Показано, что более коллимированные потоки распространяются с большими скоростями [70]. Примерами таких потоков могут служить потоки в источниках HH211 [71] и NGC2264G [63]. Потоки в обоих ЭТИХ источниках обладают большим фактором коллимации, низкоскоростная часть потока, лежит в кильватере высокоскоростной части (здесь обе части потока исследовались по линии ¹²CO). В обоих потоках граничная скорость потока пропорциональна расстоянию от центра потока (выполняется закон Хаббла). Оба потока хорошо описываются моделью, в высококолимированный которой джет движется окружающее сквозь

вещество, порождая поток, окружающий джет. [14, 71]. Низкоскоростная часть потока источника HH211 образует полость, в которую заключена высокоскоростная часть. Эти наблюдения подтверждают, что распространение одной или нескольких ударных волн, проникающих в окружающую среду, производят низкоскоростной поток.

В некоторых источниках наблюдаются более сложные структуры, чем молекулярный джет. В некоторых источниках наблюдаются эпизодические выбросы вещества [72]. Известны также случаи прецессии потока [73]. Также известны квадрупольные потоки. Измерения, проведенные с высоким пространственным разрешением показывают, что их следует интерпретировать как два отдельных потока [74].

Морфология потоков меняется со временем. Более молодые потоки имеют более высокий фактор коллимации, чем старые [7]. Они лучше описываются моделью моделью движущего джета. Для более старых потоков более подходит модель широкоугольного ветра, в которой ветер, распространяющийся в конусе с широким углом раскрыва сметает окружающее вещество, формируя поток. [14, 75].

1.5. Молекулярные потоки от высокомассивных протозвезд

Потоки от звезд спектрального класса В порождают потоки, в которых значения скорости изменения импульса лежат в диапазоне от 10^{-4} до 10^{-2} M_{\odot} ·км/с·год⁻¹, а скорость потери массы от 10^{-5} до $\sim 10^{-3}$ M_{\odot} ·год⁻¹ [69]. В работе [18] показано, что фактор коллимации имеет тенденцию снижаться с увеличением болометрической светимости L_{bol} и для $L_{bol}>10^3$ L_{\odot} его среднее значение составляет 2.05. Потоки от раннего спектрального класса В до позднего класса О могут быть хорошо сколлимированы, если их динамическое время [4] менее 10^4 лет. Известен случай, когда время существования джета составляет 10^6 лет, хотя ассоциированый с ним молекулярный поток имеет большой угол раскрыва [76, 77].

Молекулярные потоки от высокомассивных протозвезд с низким фактором коллимации объясняются несколькими причинами. Возможна прецессия джета, как в источнике IRAS 20166+4124 [78]. В источнике GGD 27 IRS наблюдается ветер с широким углом раскрыва, сопровождаемый джетом [76]. Источники без джета с плохо коллимированным молекулярным потоком, как правило, имеют значительный возраст (~10⁵ лет) и наблюдаются в окрестностях ультракомпактных областей HII [69].

1.6. Низкоскоростная часть молекулярных потоков

Низкоскоростная часть молекулярного потока — часть потока, которая движется со скоростями меньшими, чем высокоскоростная часть, исследуемая по излучению линий молекулы ¹²CO. В этой области спектра линии молекул ¹²CO оптически толстые, поэтому эта часть потока исследуется в линиях менее распространенных молекул. Как правило, используются линии молекулы ¹³CO, хотя иногда исследуются линии молекул SiO [79].

В работах [32, 35] показано, что массы низкоскоростной части потоков в источниках L1228 и AFGL 437 намного превышают массы его высокоскоростной части, а их энергия и механическая светимость сравнимы. В работе [35] показано, что в биполярный потоке источника L1228 зависимость массы от скорости имеет степенную зависимость и в низкоскоростном и в высокоскоростном диапазоне скоростей. Из наблюдений линий ¹²CO и ¹³CO показано [31], что для источника L1228 угол раскрыва потока у низкоскоростной части потока больше, чем у высокоскоростной.

При расчете параметров низкоскоростной части молекулярного потока основная проблема заключается в определении степени влияния окружающего стационарного молекулярного облака на принимаемые

спектры излучения линий исследуемых молекул. Эта задача решается разными способами, описанными в подразделе 1.9.

1.7. Воздействие потока на родительское молекулярное облако

Биполярный поток вносит момент импульса и энергию в окружающее молекулярное облако. Это влияние проявляется как в непосредственной близости от протозвезды, так и на больших расстояниях от нее.

Воздействие потока биполярного на оболочку протозвезды, расположенную на расстоянии $\sim 10^3 ... 10^4$ а.е. от центра детально рассмотрено в работе [7]. В этой работе исследовалось несколько МЗО на разных стадиях развития. Исследования проводились в линиях молекул ¹²CO, ¹³CO, HCO⁺ и С¹⁸О, характеризующие области потока с различной плотностью газа. Показано, что угол раскрытия потока, определенный по излучению линии ¹²СО со временем расширяется. Более плотный газ, характеризующийся излучением линий ¹³CO и HCO⁺ проявляется либо в стенках полости потока либо в непосредственной близости от протозвезды. Наиболее плотная часть оболочки (С¹⁸О), изменяется со временем. В более молодых объектах класса 0 (по классификации молодых звездных объектов [8]) градиент скорости направлен вдоль оси биполярного потока. В объектах класса 1 градиент скорости направлен почти перпендикулярно оси потока. Масса наиболее плотной части оболочки уменьшается со временем.

В МЗО на расстоянии менее ~0.3 пк от протозвезды располагается так называемое «ядро» облака — область плотного газа, окружающего протозвезду. Прямым доказательством влияния биполярного потока на ядро является систематический сдвиг средней скорости высокоплотного газа в направлении высокоскоростного потока, определенного по излучению линий молекулы ¹²СО как, например, в источнике L1228 [35]. Из-за большой плотности газа линии молекулы ¹²СО в этой области лучевых скоростей имеют очень большую оптическую толщину и ядро MЗO изучается по

линиям менее распространенных молекул CS, C¹⁸O, CH₃OH и др. В работе [80] сделано предположение, что биполярные потоки являются основным источником турбулентности в ядре. Биполярный поток может изменять форму ядра, сметая плотные слои газа [81]. В работе [82] показано, что в процессе эволюции звезда средней массы рассеивает ~90% ядра МЗО.

Биполярный поток влияет на родительское облако и за пределами плотного ядра: на расстоянии нескольких парсек от протозвезды. Потоки от маломассивных протозвезд могут увеличивать ширины линий молекул газа в облаке [1]. Потоки от массивных протозвезд могут иметь энергию, сравнимую с турбулентной энергией и гравитационной энергии связи родительского облака. Следовательно, они имеют потенциальную возможность рассеять молекулярное облако [2].

1.8. Методы определения параметров высокоскоростной части потоков

В литературе, для определения параметров биполярных потоков, чаще всего используют методы, основанные на предположении о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР). Более сложные модели более точно решают задачу о переносе излучения, но требуют знаний или предположений о внутренней структуре облака, что не всегда возможно сделать. В настоящей работе рассмотрены только методы расчета параметров молекулярных потоков, основанные на предположении о локальном термодинамическом равновесии.

Методы, основанные на ЛТР базируются на следующих предположениях [83]:

- 1) Все молекулы, находящиеся в облаке вдоль луча зрения должны иметь одинаковую температуру возбуждения T_{ex} .
- Эта температура возбуждения должна быть одинаковой на всех переходах исследуемой молекулы.

Тогда в общем виде температура излучения будет равна

$$T_R(\upsilon) = \frac{1}{f} \Big(J(T_{ex}) - J(T_{bg}) \Big) \cdot \Big(1 - \exp(-\tau(\upsilon)) \Big), \tag{1.1}$$

где $J(T) = \frac{h\nu}{k} (\exp(h\nu/kT) - 1)^{-1}$, T_{ex} - температура возбуждения, f - фактор заполнения луча телескопа, τ - оптическая толщина, соответствующая лучевой скорости ν . Из τ вычисляется лучевая плотность молекул [83], по которой определяется масса и другие параметры потока.

Известно, что даже на крыльях линий молекулы ¹²СО оптическая толщина обычно больше 1, и для учета этого обстоятельства применяется следующая коррекция:

Проводятся дополнительные наблюдения данного объекта в линии молекулы

$$\frac{T_R^{12}(\upsilon)}{T_R^{13}(\upsilon)} \approx \frac{1 - \exp(-\tau^{12}(\upsilon))}{1 - \exp(-\tau^{13}(\upsilon))} , \qquad \frac{\tau^{12}(\upsilon)}{\tau^{13}(\upsilon)} = \frac{n^{12}}{n^{13}}$$

вычисляют оптическую толщину ¹²СО. Здесь $\tau^{12}(\upsilon)$, T_R^{12} , n^{12} , $\tau^{13}(\upsilon)$, T_R^{13} , n^{13} - оптические толщины, температуры излучения и концентрации молекул ¹²СО и ¹³СО. При этом используются различные подходы определения $\tau^{12}(\upsilon)$ при разных лучевых скоростях. В работе [84] учет оптической толщины производится с помощью интегрирования всего спектра линии. В работе [30] спектр разбивается на несколько диапазонов и $\tau^{12}(\upsilon)$ для каждого диапазона определяется индивидуально. В работах [68, 85] $\tau^{12}(\upsilon)$ аппроксимируется полиномом и корректирующий множитель определяется для любого значения υ . Некоторые авторы [4, 86] полагают излучение в крыльях линий оптически тонким и не делают коррекцию на оптическую толщину. При этом они получают в результате расчетов нижний предел параметров потока.

Температура возбуждения определяется либо из наблюдений двух переходов [67], либо по оптически толстой центральной части спектра линий ¹²CO [4, 30], либо предполагается равной некоторому значению, характерному для биполярных потоков [86].

Исследования, проведенные авторами работы [67] свидетельствуют, что фактор заполнения луча телескопа зависит от лучевой скорости. Он близок к 1 в центре и снижается к краям профиля линии ¹²CO. Фактор заполнения можно определить, имея данные наблюдений линии ¹³CO [26]. В работе [30] описан метод расчетов параметров биполярных потоков, который основан на данных наблюдений линий ¹²CO и ¹³CO. Он учитывает влияние фактора заполнения луча телескопа, а также коррекцию на оптическую толщину.

Угол наклона оси биполярного потока невозможно определить простыми методами. Поэтому некоторые исследователи [4, 5] не делают коррекцию на этот угол, получая нижний предел параметров потока. В работах [3, 6] при расчетах применяется коррекция, предполагающая средний угол наклона 57,3°.

1.9. Методы определения параметров низкоскоростных части потоков

При изучении низкоскоростных движений биполярных потоков проблема заключается в том, что в этом диапазоне лучевых скоростей кроме движения, связанного с биполярностью, присутствует также излучение окружающего родительского облака. Поэтому необходимы методы их разделения.

В работах [31] и [32] центральная область профилей линий исключена из анализа. Таким образом, расчет ведется только по крыльям линий. В работе [33] проводится усреднение всех спектров, которые наблюдались во всем облаке. Усредненная линия излучения затем аппроксимируется функцией Гаусса в центральной ее части, где предполагается присутствие только излучения окружающего облака. При этом считается, что эта аппроксимирующая кривая и есть излучение родительского стационарного облака. Массой биполярного потока считается разность масс, вычисленных по усредненному спектру и аппроксимированной кривой. В работе [34] центральная часть каждого спектра аппроксимировалась функцией Гаусса и эта аппроксимирующая кривая считалась излучением стационарного облака. Для каждого спектра вычислялась разность масс m_i , рассчитанная по наблюдаемому профилю линии и по аппроксимированному профилю стационарного облака. Сумма $\sum_i m_i$ считалась массой биполярного потока,

где *i* характеризует распределение потока по молекулярному облаку. В [35] предполагается, что стационарное облако работе симметрично относительно центра потока. Для разделения вкладов стационарного облака и биполярного потока из синесмещенной (красносмещенной) части каждого спектра вычиталась соответствующая часть спектра, снятого в точке наблюдений, которая симметрично расположена относительно центра биполярного потока. Результат вычитания рассматривался как чистое проявление биполярного потока.

Как видно из проведенного анализа, во всех существующих методах определения параметров биполярных потоков есть определенные недостатки. В первом методе центральная часть спектра исключена из анализа. Такой метод будет давать приемлемые результаты, если спектры обладают сильными крыльями. Первый, второй и третий описанные методы не учитывают явления сдвига профиля линии. Оно учтено в методе Tafalla M. и др. [35], примененного для одного источника. Однако, используемое в нем предположение о симметричности стационарного облака относительно центра аккреции является существенным ограничением. Исследования, данной работе показали, стационарное облако проведенные В ЧТО несимметрично относительно центра потока во всех трех исследуемых объектах.

Выводы к разделу 1

Данный раздел посвящён обзору современного состояния исследований биполярных потоков в молодых звездных объектах. Проведенный обзор литературы показывает, что низкоскоростная часть биполярного потока содержит основную массу потока, а также обладает энергией, сравнимой с высокоскоростной частью. При этом низкоскоростная часть значительно менее исследована по сравнению с высокоскоростной частью. Количество работ, посвященных низкоскоростной части потоков, а количество изученных объектов незначительно. Методы расчета параметров низкоскоростной части потока нуждаются в доработке.

РАЗДЕЛ 2.

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА СПЕКТРАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РТ-22

Большая часть радиоастрономических наблюдений, описанных в PT-22 данной работе, проведена на радиотелескопе Крымской астрофизической обсерватории. Для обеспечения этих наблюдений был изготовлен спектральный приемный комплекс миллиметрового диапазона длин волн. Соискатель участвовал во многих работах по разработке комплекса и полностью разработал и создал Фурье-спектроанализатор и программное обеспечение комплекса. Данный раздел посвящен описанию была изготовлена аппаратуры, которая И использовалась при радиоастрономических наблюдениях. Также описан процесс определения параметров радиотелескопа РТ-22 КрАО на частотах 87.7 ГГц и 110,2 ГГц. Основные результаты данного раздела изложены в работах [38,42-51].

Радиотелескоп РТ-22 КрАО [87], введенный в действие в 1966 году, и до настоящего времени успешно используется для проведения наблюдений радиоисточников в сантиметровом и длинноволновой части миллиметрового диапазонах длин волн. Антенна PT-22 представляет собой полноповоротную параболическую антенну. Диаметр основного зеркала составляет 22 м. Точность изготовления поверхности основного зеркала дает возможность использовать эту антенну вплоть до короткомиллиметрового диапазона длин волн. Этот радиотелескоп является единственным в СНГ инструментом, пригодным для проведения наблюдений в этом диапазоне длин волн. **PT-22** Радиотелескоп штатной системой оснащен управления, обеспечивающей точность наведения на объект около 15" и слежение за источником не хуже 5" [88]. В миллиметровом диапазоне длин волн главное зеркало антенны радиотелескопа РТ-22 облучается по схеме Кассегрена с гиперболическим вторым зеркалом – контррефлектором. В настоящее время используется контррефлектор, который был изготовлен с отклонением от

заданного профиля не более 0.05 мм. Это позволяет использовать его до длин волн менее 1 мм.

2.1. Приемный комплекс для астрономических наблюдения в диапазоне частот 85...115 ГГц на радиотелескопе РТ-22 КрАО

Для работы в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн радиотелескоп РТ-22 был оснащен приемным комплексом, который изготовлен в Радиоастрономическом институте НАН Украины (за исключением модулятора и устройства калибровки).

Приемный комплекс состоит из нижеперечисленных частей:

- модулятор и устройство калибровки;
- криогенный приемник миллиметрового диапазона длин волн;
- Фурье-спектроанализатор (512 каналов, полоса анализа 14 МГц либо 10 МГц либо 8 МГц);
- Фильтровый анализатор спектра (64 канала, полоса анализа 64 МГц);
- Система управления и сбора данных (СУСД). Система включает персональный компьютер управления с периферийными устройствами. Компьютером управляет специально разработанная программа, которая управляет всем процессом наблюдений и сохраняет полученные результаты.

Структурная схема приемного комплекса приведена на рис. 2.1. Приемник располагался в верхней кабине радиотелескопа таким образом, чтобы его облучатель совмещался с вторичным фокусом антенны. Перед облучателем устанавливался обтюраторный модулятор квазиоптического типа, который позволял осуществлять переключение: главный луч – опорный луч антенны. Опорный луч антенны отстоял на 7' по азимуту от главного



Рис. 2.1 - Структурная схема приемного комплекса для астрономических наблюдения в диапазоне частот 85...115 ГГц.

луча. Переключение осуществляется с частотой ~30 Гц. В процессе переключения генерируется сигнал модуляции, который несет информацию, по какому лучу ведется прием в данный момент времени. Сигнал модуляции затем используется в синхронном детекторе широкого канала и в

спектроанализаторах. Синхронный детектор имеет возможность работать как в режиме модуляции, так и в качестве детектора полной мощности. Обтюраторный модулятор использовался для контроля точности наведения и при определении параметров антенны. Конструктивно, модулятор был объединен с устройством калибровки. Калибровка осуществлялась по излучению черного тела располагаемого перед облучателем антенны. В качестве черного тела использовался специальный поглотитель миллиметрового диапазона длин волн. Спектроанализаторы и компьютер управления располагались в кабине управления PT-22.

2.1.1. Режимы работы аппаратурного комплекса

Созданный приемный комплекс 3-мм диапазона, предназначенный для проведения спектральных наблюдений космических источников радиоизлучения на радиотелескопе РТ-22, может работать в 3-х разных режимах: режим диаграммной модуляции, режим «наведение-отвод» и режим частотной модуляции. Каждый из режимов имеет свои особенности и предназначен для приема определенного вида сигналов при определенной погоде. Все эти режимы используют основной сигнал, содержащий сигнал от источника и опорный сигнал, в котором присутствуют только шумы системы и неба. Анализируется разница основного и опорного сигналов.

Режим диаграммной модуляции. Этот режим наблюдения обычно известен в зарубежной литературе под названием «ON-OFF». В этом режиме модуляция диаграммы направленности осуществлялась обтюратором и вспомогательным зеркалом. Таким образом, формировалось 2 луча – главный (сквозной) и опорный. Опорный луч антенны отстоял на 7' по азимуту от главного луча. Переключение между лучами осуществлялось с частотой ~30 Гп. Использование модуляции позволяет минимизировать влияние флуктуаций коэффициента передачи приемного устройства на частотах ниже частоты модуляции. Этот режим является единственным, в котором фильтрового работа Фурьевозможна анализатора спектра.

спектроанализатор может работать во всех, перечисленных в этой работе режимах.

Предполагалось, что во всех измерениях, опорный луч направлен на участок неба, где нет сигналов от космических источников. При каждом измерении в каждом канале спектроанализатора регистрировалась и усреднялась величина α , пропорциональная разнице мощности сигналов, поступающим по этим лучам. Перед началом наблюдений проводилась калибровка. Для этого перед главным лучом устанавливалось черное тело, в 30 течении секунд велись измерения, результат записывался В переменную α_i^{BB} . Затем главный луч направлялся на пустой участок неба, в течении 30 секунд велись измерения, результат записывался В переменную α_i^{sky} , где *i* - номер канала спектроанализатора. После калибровки наблюдения велись циклически. В первый полупериод цикла главный луч направлялся на источник, в течении времени t₁ велись измерения, результат записывался в переменную α_i^{on} . Во второй полупериод цикла, главный луч направлялся на пустой участок неба, в времени t₁ велись измерения, результат записывался в переменную $\alpha_i^{o\!f\!f}$. В конце наблюдений рассчитывалась усредненная по всем циклам T_a^* (T_a^* - антенная температура, на омические потери в зеркале, потери при затенении скорректированная главного зеркала контррефлектором и приемом по задним лепесткам диаграммы направленности антенны [89]). Время t_1 и количество циклов задавались оператором. Обычно время t₁ выбиралось 2 минуты, количество циклов зависело от яркости источника и погодных условий.

Достоинством этого режима является высокая частота модуляции, что позволяет проводить наблюдения в условиях относительно быстрых изменений прозрачности атмосферы (например, уменьшить влияние на точность измерений туч, что важно для наблюдений при переменной погоде на телескопе, расположенном на берегу моря). Недостатком является небольшое (всего 7 угл. мин) отклонение опорного луча от основного, что делает невозможным наблюдение больших объектов с размером более 7 угл. мин. Кроме того, в этом режиме только ¹/₄ часть времени используется для наблюдения за сигналом, и, следовательно, для получения необходимой чувствительности общее время наблюдения нужно увеличить. Пример наблюдения мазерного источника Rleo (2006 г.) в линии молекулы SiO приведен на рис. 2.2.



Рис. 2.2. - Спектр мазера в источнике RLeo (2006 г.) в режиме диаграммной модуляции.

Режим «наведение-отвод». За последние десятилетия стабильность радиоастрономической аппаратуры стала достаточно высокой, что позволило на многих радиотелескопах отказаться от использования диаграммной модуляции, заменив ее периодическим наведением всего радиотелескопа на разные участки на небесной сфере (режим «наведение-отвод»). В этом режиме снимается ограничение на размер источника, и по сравнению с режимом диаграммной модуляции, время слежения за источником удваивается.

В режиме «наведение-отвод» опорный луч не формируется. При каждом измерении в каждом канале спектроанализатора регистрировалась и усреднялась величина α, пропорциональная мощности сигнала, поступающей по главному лучу. Перед началом наблюдений проводилась калибровка. Перед главным лучом устанавливалось черное тело, в течении 30 секунд велись измерения, результат записывался в переменную α_i^{BB} . Затем главный луч направлялся на пустой участок неба, в течении 30 секунд велись измерения, результат записывался в переменную α_i^{sky} . После калибровки наблюдения велись циклически. В первый полупериод цикла главный луч направлялся на источник, в течении времени t₂ велись измерения, результат записывался в переменную α_i^{on} . Во второй полупериод цикла, главный луч направлялся на пустой участок неба, в времени t₂ велись измерения, записывался в переменную α_i^{off} . В конце наблюдений результат рассчитывалась средняя T_a^* по всем циклам. Время t_2 и количество циклов задавались оператором. Обычно время t₂ выбиралось 1 минута, количество циклов зависело от яркости источника и погодных условий. Пример наблюдения источника Rleo (2006 г.) в режиме «наведение-отвод» приведен на рис. 2.3.

Режим частотной модуляции. При режиме частотной модуляции в качестве опорного сигнала используется сигнал от источника, сдвинутый по частоте. В этом режиме используется только главный луч радиотелескопа. При каждом измерении в каждом канале спектроанализатора регистрировалась и усреднялась величина α , пропорциональная мощности сигнала, поступающей по главному лучу. Перед началом наблюдений



Рис. 2.3. Пример наблюдения мазерного источника RLeo (2006 г.) в режиме «наведение-отвод»

проводилась калибровка. Частота стабильного гетеродина f₀ (рис. 2.1) устанавливалась таким образом, чтобы сигнал от источника попадал вблизи центра спектроанализатора. Перед главным лучом устанавливалось черное тело, в течении 30 секунд велись измерения, результат записывался в переменную α_i^{BB} . Затем главный луч направлялся на пустой участок неба, в течении 30 секунд велись измерения, результат записывался В переменную α_i^{sky} . После калибровки главный луч телескопа направлялся на источник и наблюдения велись циклически. В первый полупериод цикла, частота стабильного гетеродина устанавливалась $f_0 + \Delta f$ и в течении 2 секунд велись измерения. Результат записывался в переменную α_i^{on} . Во второй полупериод цикла, частота стабильного гетеродина устанавливалась $f_0 - \Delta f$ и в течении 2 секунд велись измерения. Результат записывался в переменную α_i^{off} . В конце наблюдений рассчитывалась средняя T_a^* по всем циклам. Количество циклов задавались оператором.

Как правило, значение Δf выбиралось таким, чтобы выполнялось условие $\Delta f = \Delta f_{CA}/4$, где Δf_{CA} полоса обзора спектроанализатора. При этом сигнал от источника в разные полупериоды располагается в разных каналах,

оставаясь в полосе обзора спектроанализатора. Это в дальнейшем давало возможность произвести обработку полученных спектров следующим образом $\tilde{T}_a^*(f) = \left[T_a^*(f + \Delta f) - T_a^*(f - \Delta f)\right]/2$. При этом отношение сигнал/шум улучшается в $\sqrt{2}$ раз. По уровню шумов это эквивалентно случаю, когда радиотелескоп все время наблюдения направлен на источник. Пример наблюдения мазерного источника RLeo (2006 г.) в линии молекулы SiO в режиме частотной модуляции приведен на рис. 2.4.

Режим частотной модуляции – обеспечивает наилучшую чувствительность по сравнению с другими перечисленными режимами. Однако, для того чтобы избежать искажений спектра принимаемого сигнала, его ширина не должна превышать $2\Delta f$. Кроме того, такой вид модуляции приводит к искажению базовой линии спектра принимаемого сигнала. При использовании спектроанализатора с полосой анализа 14 МГц и $\Delta f = 3,5$ МГц, величина этих искажений не превышала 0,1 К. Эти искажения устранялись математической обработкой спектра сигнала.



a)

Рис. 2.4. Пример наблюдения мазерного источника RLeo (2006 г.) в режиме частотной модуляции (длительность накопления 60 сек). а) до обработки; б) после обработки.

Сканирование источника. Сканирование источника обычно применялось для тестовых измерений и для определения параметров радиотелескопа. Как правило, сканировались объекты, которые излучают в
широком диапазоне частот. Поэтому для регистрации такого типа сигналов применялся синхронный детектор. В этом режиме модуляция диаграммы направленности и формирование двух лучей осуществлялась обтюратором так же, как и в режиме диаграммной модуляции. При каждом измерении в синхронном детекторе регистрировалась И усреднялась величина. пропорциональная разнице мощности сигналов, поступающим по этим лучам. Перед началом наблюдений проводилась калибровка. Перед главным лучом устанавливалось черное тело, в течении 30 секунд велись измерения, результат записывался в переменную β^{BB} . Затем главный луч направлялся на пустой участок неба, в течении 30 секунд велись измерения, результат записывался в переменную β^{sky} . После калибровки наблюдения велись циклически. Главный луч радиотелескопа в выбранную позицию на небесной сфере, в течении времени t₂ велись измерения, результат записывался в переменную β^{on} . Затем главный луч направлялся на новую позицию и цикл повторялся. Время t₂ и количество циклов задавались оператором. Обычно время t₂ выбиралось 1 секунда. Программное обеспечение позволяет проводить сканы по прямому восхождению, склонению, азимуту и углу высоты. Пример скана планеты Юпитер (2010 г.) показан на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Скан планеты Юпитер (2010 г.), сделанный по углу места.

2.1.2. Калибровка

При спектральных и континуальных наблюдениях программа выводит результаты единицах антенной температуры T_a^* , скорректированной на омические потери в зеркале, потери при затенении главного зеркала контррефлектором и приемом по задним лепесткам диаграммы направленности антенны. T_a^* в канале спектроанализатора под номером *i* вычислялась следующим образом:

$$T_a^*(i) = \frac{\alpha_i^{on} - \alpha_i^{off}}{\alpha_i^{BB} - \alpha_i^{sky}} \cdot T_{CALIB}^{spectr}$$
(2.1)

для спектральных наблюдений,

$$T_a^* = \frac{\beta_i^{on}}{\beta_i^{BB} - \beta_i^{sky}} \cdot T_{CALIB}^{contin}$$
(2.2)

для континуальных наблюдений.

Здесь α_i^{BB} , α_i^{sky} , α_i^{on} , α_i^{off} - численные величины, зарегистрированные в iканале спектроанализатора, β^{BB} , β^{sky} , β^{on} - численные величины, зарегистрированные синхронным детектором определены в предыдущих и T_{CALIB}^{contin} разделах. Вычисление калибровочных множителей T_{CALIB}^{spectr} осуществлялась стандартным методом, известным в литературе как "chopperwheel method" [89]. При этом были использованы следующие приближения: приемник работал в двухполосном режиме; температура калибровочного черного тела была равна температуре окружающей среды T_{amb} ; влияние космического микроволнового фона пренебрежимо мало, hv << kT_{amb}, $h\nu << kT_{sky}$, где ν - частота, на которой проводились наблюдения, T_{sky} – яркостная температура неба. Также предполагалось, что атмосфера состоит из одного изотропного слоя, находящегося в состоянии термодинамического равновесия при температуре T_M . Параметры атмосферы считались одинаковыми на частоте сигнала и в зеркальной полосе частот приемника. При этих приближениях $T_{CALIB}^{spectr} = 2T_{amb}$ и $T_{CALIB}^{contin} = T_{amb}$. Исследование

параметров атмосферы, проведенные по разрезам атмосферы, показали, что относительная погрешность при определении величин T_{CALIB}^{spectr} и T_{CALIB}^{contin} уменьшается с увеличением угла высоты источника и не превышает 5%.

2.1.3. Криогенный приемник миллиметрового диапазона длин волн

В настоящее время на большинстве радиотелескопов мира для работы в миллиметровом диапазоне длин волн используются приемники со смесителями на сверхпроводящих элементах (SIS) на входе. Они обладают шумовой температурой около 60 К. Для радиотелескопа РТ-22 КрАО в Радиоастрономическом институте НАН Украины был создан более простой в эксплуатации и более дешевый при разработке приемник, на входе которого установлен смеситель на диоде с барьером Шоттки, который по шумовым характеристикам практически лишь незначительно уступает приемникам на SIS элементах.

В качестве смесительного элемента использован бескорпусной AsGa диод с барьером Шоттки сотовой структуры, принципиально позволяющий обеспечить наилучшие параметры смесителя на нелинейных элементах такого типа. Электродинамическая система смесителя разрабатывалась на базе волновода пониженного поперечного сечения с целью обеспечения минимальных потерь преобразования в диапазоне частот 85...115 ГГц. В месте расположения смесительного диода высота волновода понижена с 1,2 мм до 0,6 мм, что позволило обеспечить широкополосность смесительной камеры. Мощность гетеродина подводилась к смесителю через диплексер, отличительными особенностями которого являются малая длина волновода в наличие высокодобротного, чистящего сигнальном тракте И спектр гетеродина, проходного резонатора. В качестве гетеродина использовался синтезатор частоты 3 мм диапазона, выходным генератором которого была лампа обратной волны типа ОВ-71.

Охлаждаемый предварительный усилитель промежуточной частоты (ПУПЧ) на 2-х НЕМТ транзисторах фирмы Agilent обеспечивал усиление более 20 дБ и собственную шумовую температуру $T_{\rm m} \sim 2$ К при охлаждении

до 20 К. Подключение смесителя к ПУПЧу выполнено при помощи трансформатора импедансов без использования вентиля, что способствует снижению общей шумовой температуры приемника. Расположенные в криоблоке приемной элементы системы (диплексер, смеситель, предварительный усилитель промежуточной частоты) охлаждались до 20 К при помощи микрокриогенной системы замкнутого цикла типа НВК-3,2А-Р. Частотная зависимость шумовой температуры приемника, измеренной со входа облучателя в лабораторных условиях при охлаждении до 20 К приведена на рис. 2.6. Видно, что на частоте 110,2 ГГц шумовая температура приемника значительно ниже 100 К, что является приемлемым для проведения наблюдений астрономических объектов.



Рис. 2.6. - Зависимость шумовой температуры криогенного приемника 3-мм диапазона от частоты гетеродина.

Неохлаждаемая часть аппаратурного комплекса предназначена для сигнала на промежуточной частоте 1,5 ГГц и усиления принятого сопряжения С анализаторами спектра. Приемник также имеет широкополосный канал (широкий канал), в котором сигнал передается во 400 МГц). всей полосе приемника (около Выход широкого канала синхронному детектору подключался К И использовался ДЛЯ радиометрических измерений, необходимых при юстировке антенны и наблюдения континуальных источников. Синхронный детектор располагался в верхней кабине радиотелескопа в непосредственной близости от приемного устройства. Выходной сигнал оцифровывался при помощи аналоговоцифрового преобразователя (АЦП), встроенного в блок синхронного детектора и передавался в кабину управления телескопом в цифровом виде к компьютеру. Такое построение континуального канала позволило резко улучшить его помехозащищенность от устройств привода радиотелескопа и других внешних наводок. Характерное значение флуктуационной чувствительности в широком канале за 1 сек при хороших погодных условиях было ~ 0.1 К.

2.1.4. Фильтровый анализатор спектра

Фильтровый анализатор спектра предназначен для поиска спектральных линий в широкой полосе частот. Следовательно, он может быть использован для поиска источников, у которых не известна заранее лучевая скорость.

Фильтровый анализатор спектра на 64 канала с полосой анализа 64 МГц построен по схеме классического фильтрового спектроанализатора параллельного типа. Он состоит из 64 независимых каналов, каждый из которых принимает сигнал в полосе 1 МГц и имеет динамический диапазон ~20 дБ. На выходе каждого канала установлен синхронный детектор, который, используя сигнал модуляции, выдает разность между сигналами в различные полупериоды модуляции. Эта разность оцифровывается аналогоцифровым преобразователем и передается на LPT-порт компьютера, где обрабатывается управляющей программой.

2.1.5. Фурье-спектроанализатор

Типичная ширина молекулярных линий наблюдаемых в 3-х миллиметровом диапазоне длин волн составляет от нескольких сотен кГц до нескольких МГц. Для наблюдения этих линий был разработан Фурьеспектроанализатор, обладающий полосой анализа либо 8 МГц либо 10 МГц либо 14 МГц с количеством каналов либо 512 либо 2048 либо 8192 в зависимости от выбранного режима наблюдений.

С развитием цифровой техники все чаше применяются спектроанализаторы, у которых частотный анализ производится посредством применения По алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). сравнению с другими типами параллельных анализаторов спектра, акустооптическими и фильтровыми, такие спектроанализаторы отличаются, как более большим правило, динамическим диапазоном И высоким разрешением. В настоящее большинстве спектральным время на современных радиотелескопов установлены Фурье-спектроанализаторы, которые обладают полосой анализа более 1 ГГц при нескольких тысячах каналов.

Для построения спектроанализаторов с БПФ обычно применяются процессоры ____ Digital Signal Processor либо специализированные программируемые логические матрицы, которые позволяют управлять потоком цифровых данных в реальном времени. В разработанном нами БПΦ центральный спектроанализаторе счет выполняет процессор персонального компьютера (ПК). Преимущества такой системы перед DSP следующие:

- ПК является хорошо известным, общедоступным и надежным устройством, широко применяющимся в науке и технике, а использование интерфейса АТА для организации скоростного канала ввода данных позволило создать простое и дешевое устройство сопряжения для ввода аналогового сигнала
- Тактовая частота центрального процессора ПК в настоящее время в несколько раз больше чем даже у лучших DSP, что соответственным образом сказывается на скорости счета. Кроме того, устаревший компьютер можно заменить на более современный, улучшив тем самым характеристики спектроанализатора;
- Оперативную память ПК можно нарастить до больших значений, решив тем самым проблему хранения результатов;

 Основную программу для ПК можно написать на языке высокого уровня, используя его мощный механизм отладки.

Основной недостаток системы, использующей центральный процессор в качестве основного счетного устройства, состоит в низкой скорости счета процессора ПК по сравнению с DSP (Digital signal processor) и программируемыми логическими матрицами. Это существенно снижает полосу анализа такого устройства. К недостаткам также можно отнести асинхронную структуру персонального компьютера, вследствие чего все его временные характеристики реализуются с меньшей точностью, чем у DSP процессоров. Кроме того, иногда для увеличения скорости вычислений используются многопроцессорные системы. В данном случае использовать совместно несколько ПК возможно только связав их относительно медленной связью, что ограничивает класс решаемых такой системой задач.

Разработанный нами спектроанализатор перекрывает диапазон, характеризующийся небольшими полосами анализа при высоком спектральном разрешении, чем и определяется область его применения: наблюдения в низкочастотной части спектра (до нескольких мм), а также наблюдения источников, излучающих в небольшом диапазоне лучевых скоростей, например мазерные источники и холодные молекулярные облака и т.д.

В период с 2002 по 2007 годы соискателем было создано два экземпляра Фурье-спектроанализатора по сходной технологии. Первый из них, созданный в 2002 году, имеет полосу обзора либо 2 МГц либо 4 МГц в зависимости от выбранного режима работы. Он был передан Крымской астрофизической обсерватории для наблюдений космических мазеров на молекуле воды на частоте 22 ГГц и успешно используется до настоящего времени. Второй, созданный в 2007 году, имеет полосу обзора либо 8 МГц либо 10 МГц либо 14 МГц в зависимости от выбранного режима работы и используется для наблюдений космических объектов в 3-мм диапазоне длин волн. Оба спектроанализатора имеют возможность реализовывать либо 512 либо 2048 либо 8192 канала.

Фурье-спектроанализатор С помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) оцифровывает входной сигнал, осуществляет Фурьепреобразование и вычисляет энергетический спектр сигнала. Важным спектроанализаторов условием для параллельного типа является непрерывное накопление входного сигнала В каждом канале спектроанализатора. Для Фурье-спектроанализатора означает ЭТО необходимость наличия быстродействующего цифрового канала передачи оцифрованных данных в оперативную память компьютера. Данные должны располагаться эквидистантно и передача данных не должна загружать центральный процессор компьютера, который в это время занят расчетом уже принятых данных.

Контроллер для скоростной связи компьютера внешним С устройством. В 2001 году, когда соискателем разрабатывался первый варианта спектроанализатора, наиболее распространенным способом скоростной передачи данных в персональный компьютер было создание устройств сопряжения, подключаемых к шинам ISA (Industry Standard Architecture) или PCI (Peripheral component interconnect) Порты USB 2 не были распространены, а порты USB 1 не обеспечивали достаточную скорость передачи. Шина ISA широко известна разработчикам и хорошо описана в литературе. Она обеспечивает максимальную скорость передачи 8 мегабайт в секунду. Максимальная скорость передачи по РСІ достигает 132 мегабайт в секунду, однако разработка и создание устройств сопряжения для шины PCI намного сложнее и дороже, чем для шины ISA.

Автором был разработан контроллер, взаимодействующий с интерфейсом АТА (AT Attachment), который в режиме DMA (прямой доступ к памяти) обеспечивает пиковую скорость передачи 16 мегабайт в секунду (имеется в виду адаптер АТА, подключенный к шине PCI). При этом его принципиальная схема проще, чем у контроллера, сопряженного с ISA.

Достоинства такого контроллера — это простота конструкции, дешевизна, несложная отладка, а также более высокая по сравнению с ISA скорость передачи. С простотой конструкции связаны и его недостатки. Такой контроллер не отвечает всем стандартам интерфейса АТА. Кроме того, установка скорости обмена производится "вручную", непосредственным изменением содержимого конфигурационных регистров АТА, в связи с чем контроллера компьютера перенос С одного на другой связан С определенными трудностями.

Безусловно, предпочтительнее конструировать аппаратуру следуя существующим стандартам и такой контроллер не может быть использован в массовом производстве, однако его можно применить в устройствах, создаваемых в единичных экземплярах и работающих с одним и тем же компьютером.

Интерфейс AT Attachment предназначен для подключения устройств типа IDE (Integrated Device Electronics) — устройств со встроенным контроллером. B таких устройствах контроллер размещается Обмен непосредственно вблизи диска. данными происходит информационными байтами И словами, a не закодированными последовательностями импульсных сигналов. Существует стандартизированная система команд и протокол обмена данными между хост-адаптером и устройствами IDE. Кроме средств сопряжения PCI, хостадаптер имеет в своем составе дешифратор адреса. Все это дает возможность подключить вместо IDE устройства несложный контроллер, выполняющий только команды обмена данными.

Контроллер поддерживает два режима ввода-вывода данных адаптера АТА — РІО (программный ввод-вывод) и DMA. Особенно важен DMA режим, так как в этом режиме можно реализовать большую скорость передачи, а сам процесс передачи данных осуществляется АТА адаптером, не затрагивая центральный процессор компьютера.

Скорость устанавливается ATA передачи данных адаптером компьютера. Существует несколько отличающихся по скорости режимов PIO И DMA. При включении компьютера BIOS производит опрос всех подключенных IDE устройств и настраивает каждое из них на максимальную скорость передачи. Таким образом, установка скорости производится автоматически и не существует универсальной команды для хост-адаптера, настраивающей его на выбранный режим. Контроллер, рассмотренный в данной работе, BIOS "не видит", и по умолчанию настраивает второй канал адаптера АТА на минимальную скорость. Изменить скорость передачи возможно непосредственным изменением содержимого конфигурационных При ATA. ЭТОМ необходимо обладать регистров соответствующей информацией. Каждый чипсет обладает своим набором конфигурационных регистров. Крупнейшие производители чипсетов фирмы Intel и AMD предоставляют необходимую информацию на своих интернет-сайтах. Автор контроллер на компьютерах, оборудованных различными испытывал чипсетами фирм INTEL И АМD. Адаптер АТА настраивался на максимальную скорость передачи данных по шине АТА в режиме DMA (16) мегабайт в секунду).

К контроллеру разработан драйвер, который управляет АТА адаптером. Драйвер написан на ассемблере с помощью пакета Driver Development Kit для операционной системы Windows 98, свободно распространяемым фирмой Microsoft. Для проверки работоспособности контроллера было разработано специальное устройство, подающее на контроллер заранее известный числовой код. После чтения данных, проверялось соответствие этого кода и считанных данных.

Для проверки скоростных характеристик контроллера, измерялось значение, характеризующее способность компьютера под управлением Windows 98 принимать и обрабатывать поток данных в течении длительного времени. В реальном устройстве компьютер, оборудованный двумя такими контроллерами, непрерывно принимал поток данных со скоростью передачи 16 мегабайт в секунду в течении нескольких десятков секунд. Потеря времени в такой системе составляла около 1% относительно общего времени передачи. То есть, отношение времени "чистой" передачи (количество принятых байт / скорость передачи) и общего времени, потраченного на передачу всех байт, составляло 0,99. При этом центральный процессор компьютера почти постоянно был занят обработкой поступающего потока данных.

Описание спектроанализатора. В описанном выше контроллере скорость чтения задается персональным компьютером. Поскольку компьютер является асинхронным устройством, считанные данные на временной шкале могут располагаться не эквидистантно. Следовательно, компьютер не может выступать в роли задатчика сигнала запуска аналого-цифрофого преобразователя и поэтому данные, поступающие от АЦП необходимо буферизировать. Для этого были созданы платы сопряжения.

В состав спектроанализатора входят персональный компьютер, две идентичные платы сопряжения, подключаемые к компьютеру через интерфейс АТА, и плата АЦП (рис. 2.7).

Оба экземпляра спектроанализатора собраны по сходной схеме. Отличия заключены в платах АЦП. В первом экземпляре спектроанализатора 6-ти битовый поступающий аналого-цифрового поток данных, OT преобразователя, непосредственно передается на платы сопряжения. Во втором экземпляре с полосой анализа 8 МГц, 8-ти битовый поток данных, поступающий от аналого-цифрового преобразователя, преобразуется в 16-ти битовый с вдвое меньшей частотой дискретизации и передается на платы сопряжения. Во втором экземпляре с полосой анализа 10 МГц и 14 МГц, 4-х битовый поток данных, поступающий аналого-цифрового OT преобразователя, преобразуется в 16-ти битовый с частотой в 4 раза меньшей, чем первоначальный и передается на платы сопряжения. В данном разделе описан второй экземпляр спектроанализатора с полосой обзора 8 МГц.



Рис. 2.7. Блок-схема спектроанализатора.

Входной сигнал поступает на плату АЦП, усиливается входным широкополосным усилителем, коэффициент усиления которого задается программой, работающей на персональном компьютере. Следующий за ним полосовой фильтр с полосой пропускания 0...8 МГц обрезает спектр сигнала вне полосы анализа спектроанализатора. Аналого-цифрофой преобразователь оцифровывает аналоговый сигнал по тактовому сигналу, поступающему с блока управления платой АЦП, с частотой 16 МГц. В спектроанализаторе применяется 10-разрядный АЦП, для передачи данных в компьютер используется 8 старших разрядов. Оцифрованный сигнал запоминается в регистрах 1 и 2. Регистры запоминают информацию поочередно. В каждый регистр записывается данные, соответствующие N такту АЦП, в то время как в другом регистре содержатся данные, соответствующие N-1 такту АЦП. Это позволяет преобразовать поток данных, поступающий от АЦП, имеющий 8 разрядов и частоту дискретизации 16 МГц в поток данных, использующийся в дальнейшем на платах сопряжения (16 разрядов, частота дискретизации 8 МГц). Общее управление платой АЦП осуществляется Блоком управления платой АЦП.

Буферизация данных, поступающих с платы АЦП, осуществляется платами сопряжения. Платы сопряжения - это практически идентичные устройства, отличающиеся адресом, по которому к ним обращается адаптер АТА (Шина адреса на рис 2.7). Каждая плата сопряжения может работать в одном из двух режимов, один из которых позволяет произвести запись данных с платы АЦП в буферную память по стробу записи, поступающему с платы АЦП, а второй осуществить чтение данных из буферной памяти и передать их в ПК в темпе, определяемым адаптером АТА. Перед началом передачи, Блок управления получает от адаптера АТА соответствующую команду, обнуляет счетчик, настраивает режим буферной памяти (чтение/запись), открывает соответствующие буферные формирователи. Во время передачи данных Блок управления платой сопряжения передает стробы чтения(записи) от адаптера АТА(Платы АЦП) на счетчик и для управления буферной памятью.

При получении от счетчика сигнала переполнения, Блок управления устанавливает буферные формирователи в режим Z-состояния и ожидает команд от компьютера. Все шины данных на Плате сопряжения 16разрядные, передача данных идет со скоростью 16 мегаслов в секунду.

Работа спектроанализатора происходит циклически. Во время цикла одновременно осуществляются три процесса (рис. 2.8). Аналоговый сигнал оцифровывается АЦП и сохраняется в буферной памяти одной из плат сопряжения. Одновременно с этим данные, сохраненные во второй плате сопряжения, используя интерфейс АТА, передаются в оперативную память компьютера. Передача происходит в режиме DMA без участия центрального процессора. Процессор в это время выполняет вычисление быстрого преобразования Фурье и накапливает спектр сигнала. После завершения всех трех процессов компьютер перенаправляет потоки данных и цикл повторяется. По истечении времени накопления t_u , все принятые спектры усредняются, и результат записывается в оперативную память компьютера.

На рис. 2.8 показаны временные диаграммы двух циклов работы спектроанализатора. t_c — время заполнения буферной памяти потоком данных, поступающим с платы АЦП. Конструкция платы АЦП такова, что t_c определяется формулой: $t_c = 2 \cdot M_E / f_T = 4096$ мкс, где $M_E = 32$ килослова — объем буферной памяти, а f_T — частота тактового генератора (16 МГц). При этом, полоса анализа спектроанализатора $\Delta f_{CA} = f_T / 2 = 8$ МГц. Здесь

 t_n — время передачи из буферной памяти платы сопряжения в оперативную память компьютера. $t_n = M_E / f_0$, где f_0 — частота опроса компьютером буферной памяти. f_0 определяется конструкцией платы сопряжения и чипсетом компьютера. f_0 желательно максимально повысить. Плата сопряжения поддерживает скорость чтения/записи в/из буферной памяти до 10 мегаслов в секунду. Адаптер АТА поддерживает несколько режимов, отличающихся скоростью передачи данных. Наиболее подходящим является

режим DMA-4, что соответствует скорости передачи 8 мегаслов в секунду. Этот режим используется в спектроанализаторе. Таким образом, $t_n = 4096$ мкс.



Рис. 2.8. Временные диаграммы работы спектроанализатора. Процесс A₁ — сохранение входного сигнала в буферной памяти платы сопряжения 1

Процесс A₂ — передача данных из буферной памяти платы сопряжения 2 в оперативную память компьютера

Процессы А₃ и Б₃ — счет Фурье-преобразования

Процесс Б₁ — сохранение входного сигнала в буферной памяти платы сопряжения 2

Процесс Б₂ — передача данных из буферной памяти платы сопряжения 1 в оперативную память компьютера

 t_{ϕ} – время счета центральным процессором Фурье-преобразования всех значений, содержащихся в буферной памяти (в данном случае 65536 8битовых данных). В программе использовался алгоритм БПФ Radix-4, примененный для вычисления преобразования Фурье от массива вещественных значений [90]. Количество точек, по которым производится преобразование Фурье, задается программно и определяет количество каналов спектроанализатора.

 t_{κ} – время, затрачиваемое на перекоммутацию плат сопряжения. t_{κ} намного меньше t_{ϕ} , t_c , t_n и составляет около 1% относительно t_c .

 t_u – общее время, затраченное на прием и обработку пришедших данных.

К спектроанализатору прилагается программное, работающее в операционной системе Windows 98 и позволяющее проводить наблюдения, тестировать и настраивать спектроанализатор на различные режимы работы Время накопления t_u задается от 1 до сотен секунд. Количество частотных каналов определяется программно и может быть равным 512, 2048 или 8192. Предусмотрена возможность использования окон данных, а также установки коэффициента перекрытия периодограмм.

Внешний вид спектроанализатора показан на рис. 2.9. В первом экземпляре спектроанализатора две платы сопряжения собраны в едином блоке, размещающимся в 5-дюймовом «кармане» корпуса компьютера. Питание на платы сопряжения подается от компьютера. Плата АЦП вынесена за пределы корпуса компьютера и имеет независимое от компьютера питание. Во втором экземпляре спектроанализатора все платы размещены 5-дюймовом «кармане» корпуса компьютера. Питание спектроанализатора осуществляется аналогично тому, как это сделано в первом экземпляре.





Рис. 2.9. Внешний вид 1-го экземпляра спектроанализатора (рис. 2.9а) и 2-го экземпляра спектроанализатора (рис. 2.9б)

Результаты лабораторных исследований. Очевидно, что для минимизации потерь времени накопления сигнала, необходимо выполнение следующих условий $t_n \leq t_c$ и $t_{\phi} \leq t_c$. Первый экземпляр спектроанализатора следствии небольшой полосы анализа имеет большое значение t_c , и эти условия легко выполняются. Первый экземпляр спектроанализатора практически не имеет потерь времени накопления сигнала.

Второй экземпляр спектроанализатора С течением времени устанавливался на все более быстродействующие компьютеры. При этом время вычисления Фурье-преобразования t_{ϕ} уменьшалось, а t_n оставалось неизменным. t_c удалось уменьшить, путем уменьшения разрядности анализируемых данных. Это позволило модернизировать спектроанализатор, расширив его полосу обзора. В настоящее время спектроанализатор установлен на компьютер с одноядерным процессором Pentium с тактовой частотой 3,2 ГГц. В таблице 2.1 приведены измеренные значения коэффициента используемого времени, который определяется как отношение времени накопления сигнала к общему времени, затраченному на прием и обработку пришедших данных $K_{\mu} = N \cdot t_{c} / t_{\mu} \cdot 100\%$ (рис 2.8).

Как видно из таблицы 2.1, компьютер с процессором Pentium, работающий на частоте 3,2 ГГц, обладает достаточной скоростью счета и для реализации $\Delta f_{CA} = 8$ МГц и для $\Delta f_{CA} = 10$ МГц, (для 512 и 2048 каналов). Дополнительные тесты показали, что в этом случае имеется запас времени, который можно использовать, например, для перекрытия периодограмм [9192]. При полосе анализа $\Delta f_{CA} = 14$ МГц, процессор уже не успевает обработать приходящие данные, время t_{ϕ} становится больше t_c , и спектроанализатор начинает терять время, в течении которого накапливается сигнал. Это приводит к увеличению шумов и может быть скомпенсировано увеличением времени наблюдения.

Таблица 2.1.

Коэффициент используемого времени для разных экземпляров спектроанализатора.

Δf_{CA} ,	Разрядность	Количество	Форма окна	$K_u, \%$
ΜΓц	анализируемых	каналов		
	данных			
8	8	512	Прямоугольник	99
			Гауссиан	99
		2048	Прямоугольник	99
			Гауссиан	99
		8192	Прямоугольник	99
			Гауссиан	99
10	4	512	Прямоугольник	99
			Гауссиан	99
		2048	Прямоугольник	99
			Гауссиан	99
		8192	Прямоугольник	82
			Гауссиан	81
14	4	512	Прямоугольник	85
			Гауссиан	83
		2048	Прямоугольник	71
			Гауссиан	70

Были проведены лабораторные измерения отклика спектроанализатора на синусоидальный и широкополосный шумовой сигналы. На рис. 2.10 показан отклик спектроанализатора на синусоидальный сигнал. Кривые 1 и 3 получены при использовании прямоугольного окна, кривые 2 и 4 -Гауссового окна. В случае 3 и 4 частота входного сигнала совпадала с частотой одного из каналов спектроанализатора. Наиболее неблагоприятные случаи 1 и 2 — частота входного сигнала лежит на середине между двумя При соседними каналами. ЭТОМ максимально сильно проявляется собственный шум спектроанализатора. Во всех случаях точность настройки частоты входного сигнала была не хуже 100 Гц. Из рисунка видно, что даже в наихудшем случае, при применении Гауссового окна безпомеховый динамический диапазон (spurious-free dynamic range) спектроанализатора превышает 45 дБ для 1-го экземпляра спектроанализатора и для 2-го экземпляра спектроанализатора при полосе анализа 8 МГц. Также безпомеховый динамический диапазон превышает 35 дБ для 2-го экземпляра спектроанализатора при полосе анализа 10 МГц и 14 МГц.



Рис. 2.10. Зависимость выходной мощности спектроанализатора от частоты при подаче на вход синусоидального сигнала. Кривые 1 и 3 получены при использовании прямоугольного окна, кривые 2 и 4 - Гауссового окна. В случае 3 и 4 частота входного сигнала совпадала с частотой одного из каналов спектроанализатора. Наиболее неблагоприятные случаи 1 и 2 — частота входного сигнала лежит на середине между двумя соседними каналами.

Отклик спектроанализатора на широкополосный шумовой сигнал показан на рис. 2.11. Видно, что линейность отклика соблюдается в диапазоне не менее 35 дБ для спектроанализатора с полосой анализа 2 МГц, 40 дБ для спектроанализатора с полосой анализа 8 МГц и 20 дБ для спектроанализатора с полососами анализа 10 и 14 МГц. Завал кривой в области малых мощностей на рис. 2.11а, 2.11в, 2.11г объясняется тем, что шум входного каскада меньше шага квантования АЦП.



Рис. 2.11. Отклик спектроанализатора на белый шум.

Результаты испытаний спектроанализатора реальных В наблюдениях на радиотелескопе. При всех режимах характеристики спектроанализатора удовлетворяют условиям радиоастрономических наблюдений в СВЧ диапазоне в составе приемных систем с преобразованием сигнала в диапазон рабочих частот спектроанализатора. Спектроанализаторы входят в состав приемных комплексов на радиотелескопе PT-22 и используются для спектральных исследований космических источников. На рис. 2.12 приведены результаты наблюдений, проведенных с этими спектроанализатороми. На рис. 2.12а показана мазерная линия молекулы воды на частоте 22 ГГц в источнике W49S (2003 г.). Полоса анализа спектроанализатора в была выбрана 2 МГц, ширина канала 4 кГц, время накопления составляло 40 секунд. На рис. 2.126 показана линия молекулы ¹³СО на частоте 110,2 ГГц в источнике IRAS 22267+6244 (2008 г.). Полоса анализа спектроанализатора была выбрана 14 МГц, ширина канала 28 кГц, время накопления составляло 800 секунд.



Рис. 2.12. Спектры излучения водяного мазера в W49S (а) и тепловое излучение молекулы ¹³CO в IRAS 22267+6244 (б).

2.1.6. Система управления и сбора данных

В настоящее время на радиотелескопе РТ-22 установлена штатная система управления на основе ЭВМ IBM PC-AT и аппаратных средств системы КАМАК. Эта система позволяет сопровождать источник, используя для наведения прямое восхождение и склонение источника, которые заданны Для организации на текущий момент времени. режимов, обычно применяемых при спектральных наблюдениях молекулярных линий, для сканирования источника а также для управления и сбора информации с приемной аппаратуры, необходима дополнительная система управления. В наших исследований были начале попытки использовать систему управления, разработанную в институте прикладной физики РАН (Нижний Новгород) около 20 лет назад. Однако она не могла обеспечить работу созданной нами приемной системы и поддерживать необходимые режимы наблюдений. Для замены была разработана новая система управления и сбора данных (СУСД), которая поддерживает новые устройства и отвечает современным требованиям дизайна и эргономики.

СУСД осуществляет общее управление всем процессом проведения наблюдений, а также дает возможность проводить различные тесты приемного комплекса. СУСД является системой реального времени и при проведении наблюдений, информация оперативно отображается на экране, а оператор может в любой момент прервать измерения.

СУСД включает в себя модуль для расчета астрономических параметров источника необходимых для выставления частоты стабильного гетеродина и наведения антенны:

 Пересчет координат во второй экваториальной системе координат с любого момента времени на текущий момент времени.

- Расчет лучевой скорости источника на текущий момент времени.

Специальная процедура для сопровождения источников, которые движутся по небесной сфере. При этом используестя программный пакет NOVAS-C ver. 2.0, основанный на работе [93].

Система управления и сбора информации позволяет проводить наблюдения в следующих режимах:

- Режим наблюдений "ON-OFF".

- Режим наблюдений «наведение – отвод».

– Режим частотной модуляции.

– Режим сканирования источника.

СУСД позволяет сохранять результаты наблюдений на жестком диске, а также считывать сохраненные данные для их просмотра и обработки. Также имеется возможность экспортировать полученные результаты в виде текстовых файлов либо файлах данных типа FITS.

Кроме основных режимов, СУСД имеет набор тестов для проверки аппаратуры. Программа также содержит математический блок, позволяющий осуществлять аппроксимацию экспериментальных данных Гауссовой кривой и полиномом, вычитать базовую линию, а также суммировать и усреднять результаты нескольких наблюдений.

СУСД работает на персональном компьютере Pentium-IV с тактовой частотой центрального процессора 3,2 ГГц. Спектроанализатор с полосой анализа 64 МГц, а также синхронный детектор подключаются через LPTпорт компьютера. Фурье-спектроанализатор подключается к компьютеру через АТА-интерфейс и при своей работе использует центральный процессор персонального компьютера. Управление антенной осуществляется подачей команд через СОМ-порт компьютера на штатную систему управления РТ-22. Управление частотой стабильного гетеродина также осуществляется через Программа СОМ-порт компьютера. предназначена для работы В операционной системе Windows 98. Внешний вид программы показан на рис. 2.13.



Рис. 2.13. Внешний вид программы СУСД.

2.2. Характеристики РТ-22 в 3-х миллиметровом диапазоне длин волн

Опубликованные данные о параметрах РТ-22 в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн относятся к 1970-м годам [94, 95].

Однако возможные деформации поверхности главного зеркала за прошедшее время могли привести К существенным изменениям параметров радиотелескопа. Кроме того, на частоте линии молекулы ¹³CO (J=1-0) 110,2 ΓГш КИДН (коэффициент использования 0 ланные диаграммы направленности) в литературе отсутствовали. Исходя из этого, были определены следующие задачи:

- Определение параметров РТ-22 на частоте 87,7 ГГц и сравнение их с параметрами, измеренными ранее .
- Определение параметров РТ-22 на частоте 110,2 ГГц, соответствующей частоте линии молекулы ¹³СО (J=1-0).

Эти задачи стали еще более актуальными после замены старого конррефлектора. После установки нового контррефлектора потребовалась полная юстировка антенны.

2.2.1. Определение параметров РТ-22 на частоте 87.7 ГГц

Перед проведением измерений, направленных на определение параметров антенны РТ-22, была проведена юстировка антенны, которая заключалась в определении оптимального положения контррефлектора относительно главного зеркала.

Юстировка антенны. Основной задачей юстировки кассегреновской системы антенны радиотелескопа при установке нового контррефлектора является обеспечение соосности и совмещения фокусов параболоида и гиперболоида. Юстировку желательно проводить на наиболее коротких длинах волн, так как при этом обеспечивается наилучшая точность. Совмещение фокусов параболического главного зеркала и гиперболического контррефлектора проводилось в 3 мм диапазоне длин волн. При выборе метода, который был использован, учитывалось следующее.

Применение метода с источником, расположенным в дальней зоне, требует его размещения на расстояниях больших, чем 300 км (при отношении диаметра главного зеркала к длине волны $\frac{D}{\lambda} \sim 3000$). Это

фактически не позволяет использовать наземные источники. В работе [96] было предложено проводить настройку больших антенн по искусственному источнику в ближней зоне, однако это требует выноса облучателя из фокуса, положение которого априорно известно с низкой точностью. Проводить настройку антенны при малых углах места нежелательно, поскольку турбулентность атмосферы приводит к заметным флуктуациям сигнала. Кроме того, при малых углах весовые деформации антенны имеют наибольшую величину. Поэтому и радиоастрономические наблюдения на телескопах миллиметрового диапазона при малых (меньше 20°) углах ограничены.

Юстировка антенны И измерения ee главных характеристик осуществлялось по источникам, расположенным в дальней зоне антенны (космическим объектам). Достоинством такого метода является возможность исследований угловых зависимостей, проведения т.е. определения характеристик антенны углах, которых при на ведутся радиоастрономические наблюдения. Вместе с тем, интенсивность излучения метагалактических источников В 3 MM галактических И диапазоне недостаточна для реализации необходимого отношения сигнал/шум при измерениях без применения методов накопления сигнала. Поэтому для работ по юстировке были выбраны планеты Венера и Сатурн.

Юстировка радиотелескопа РТ-22 проводилось в 2006 году на частоте 87.7 ГГц. При наблюдениях использовался криогенный приемник 3-х мм диапазона длин волн с шумовой температурой менее 100 К. Шумовая температура системы в режиме двухполосного приема сигнала (DSB) составляла около 350 К, флуктуационная чувствительность приемной системы за 1 сек была не хуже 0,1 К. Калибровка антенной температуры осуществлялась стандартным методом по черному телу [89, 97]. Измерения проводились в ночное время суток.

На антенне РТ-22 имеется возможность дистанционного перемещения контррефлектора вдоль оси антенны на величину ± 13 мм. В 2006 году были

проведены настроечные работы по отысканию максимума мощности принимаемого сигнала OT Сатурна при изменении положения контррефлектора вдоль оси антенны. Зависимость мощности принятого сигнала от положения контррефлектора приведены на рис. 2.14. Сплошной линией показана аппроксимация экспериментальных данных параболой. В целом поведение экспериментальной кривой соответствует результатам математического моделирования. Так в области положений контррефлектора от 2,0 до 2,5 мм наблюдается зона малой чувствительности ширины диаграммы направленности К величине совмещения фокусов. Для дальнейшей работы было принято значение положения контррефлектора +2,2 мм, что соответствует оптимальной настройке антенны после замены контррефлектора.



Рис. 2.14. - Зависимость мощности принятого сигнала от положения контррефлектора. Сплошной линией показана аппроксимация экспериментальных данных параболой, точки – экспериментальные данные.

Определение параметров главного лепестка диаграммы направленности антенны. Определение формы диаграммы направленности антенны проводилось по наблюдениям планеты Венера на частоте 87.7 ГГц в августе 2008 года. В это время видимый диаметр Венеры составлял около 10", что гораздо меньше ширины главного лепестка антенны. Это дало возможность непосредственно получить поперечное сечение диаграммы направленности. Наблюдения проводились в период кульминации. Перед измерениями для определения положения центра планеты определялись поправки наведения телескопа по прямому восхождению и склонению. Затем планета многократно сканировалась ПО углу склонения С прямым восхождением, смещаемым относительно центра планеты на заданное значение, после чего опять определялись поправки наведения. По известным измерений, поправкам начале В конце применяя линейную В И корректировались аппроксимацию, координаты ДЛЯ каждого скана. Поперечные сечения диаграммы направленности на частоте 87,7 ГГц приведены на рис. 2.15.



Рис. 2.15. Поперечные сечения диаграммы направленности. Пунктиром показан уровень половинной мощности. Сплошной линией показан уровень половинной мощности в приближении круговой симметрии.

Из рис. 2.15 видно, что диаграмма направленности обладает почти круговой симметрией. В этом случае ширину диаграммы направленности на уровне половинной мощности θ_b с достаточной точностью можно рассчитать по формуле [98]

$$\theta_b = \sqrt{\theta_f^2 - \frac{\ln 2}{2} \theta_s^2}, \qquad (2.3)$$

где θ_f - ширина скана, θ_s - ширина источника на уровне половинной мощности. Было проведено большое количество сканов Венеры в 2007 и

2008 годах и в результате получено усредненное значение для ширины диаграммы направленности антенны $\theta_b = 47"\pm 5"$.

Определение эффективности телескопа и параметров атмосферы. Под эффективностью телескопа здесь подразумевается величина η_l , введенная в статье [89] и описывающая потери мощности принимаемого сигнала источника, обусловленные омическими потерями, потерями при затенении главного зеркала контррефлектором и приемом по задним лепесткам диаграммы направленности антенны. Определение параметров атмосферы проводилось методом вертикального разреза атмосферы. Измерения проводились на частотах 87.7 ГГц и 110,2 ГГц. Проведение одного разреза атмосферы осуществлялось следующим образом. Антенна устанавливалась под углом места h_i и записывалось показание детектора β_i^{off} . Затем перед рупором устанавливался калибровочный источник (черное тело) и снова записывалось показание детектора β^{amb} . После этого изменяли угол места h_i и цикл измерений $\beta_i^{o\!f\!f}$ и β^{amb} повторялся. Для одного разреза атмосферы проводились измерения на 8 различных углах места h_i . По найденным значениям $\beta_i^{o\!f\!f}$ и β^{amb} вычислялись значения функции $\gamma_i = \frac{\beta_i^{off}}{\beta^{amb}}$, которые использовались при дальнейшем анализе. Преимущество такого подхода состоит в том, что функция γ не зависит от коэффициента усиления приемной системы, что повышает точность измерений.

Параметры атмосферы и эффективность телескопа из этих измерений определялись следующим образом. Выражения для β_i^{off} , β^{amb} и γ в двухполосном режиме приема сигнала записываются в виде

$$\beta_i^{off} \sim \left[T_{rec} + \left(1 - \eta_l\right) \cdot T_{amb} + \eta_l \cdot T_M \left(1 - \exp\left(-\tau / \sin(h_i)\right) \right) \right]$$
(2.4)

$$\beta^{amb} \sim \left[T_{rec} + T_{amb} \right] \tag{2.5}$$

$$\gamma = \frac{\left[T_{rec} + \left(1 - \eta_l\right) \cdot T_{amb} + \eta_l \cdot T_M \left(1 - \exp\left(-\tau / \sin(h)\right)\right)\right]}{\left[T_{rec} + T_{amb}\right]},$$
(2.6)

где T_{rec} — шумовая температура приемника, T_{amb} — температура окружающей среды. Предполагалось, что атмосфера является однородной средой, находящейся в состоянии термодинамического равновесия при температуре T_M . Оптическая толщина атмосферы в зените равна τ_a . Функция γ представлялась зависящей от переменной h и параметров T_{rec} , T_{amb} , T_M , τ_a . При таком рассмотрении, имея массивы известных значений γ_i и h_i , функция γ анализировалась методом наименьших квадратов и определялись параметры T_{rec} , T_{amb} , T_M , τ_a .

Шумовая температура приемника и эффективность телескопа не зависят от параметров атмосферы. Их значения были определены по результатам нескольких разрезов атмосферы. Найденные значения: $T_{rec} = 97\pm16$ K, $\eta_l = 0.8\pm0.03$.

Параметры атмосферы T_M и τ_a , определенные по разрезу атмосферы, который был проведен непосредственно перед проведением измерений эффективной площади и коэффициента использования диаграммы направленности (КИДН), использовались в дальнейшем для коррекции антенной температуры.

Определение эффективной площади и коэффициента использования диаграммы направленности. Измерения эффективной площади и коэффициента использования диаграммы направленности радиотелескопа РТ-22 на частоте 87.7 ГГц проводились в октябре 2007 года по наблюдениям планеты Венера. Видимый диаметр Венеры в это время был соизмерим с шириной диаграммы направленности РТ-22, что дало возможность определить как эффективную площадь, так и КИДН. Антенная температура Венеры составляла более 20 К, что обеспечивало отношение сигнал/шум более 200.

65

При измерении параметров телескопа по планетам, выражение для эффективной площади можно записать следующим образом [99]:

$$A_{eff} = \frac{4 \cdot T_a^{'} \cdot \lambda^2}{T_b \cdot \pi \cdot \theta_s^{2}} \cdot \frac{z^2}{1 - \exp(-z^2)}, \qquad (2.7)$$

где T_a - антенная температура, скорректированная на поглощение в атмосфере, $z = \sqrt{\ln 2} \frac{\theta_s}{\theta_b}$. Предполагается, что планета – это однородный диск диаметром θ_s и яркостной температурой T_b . Яркостная температура Венеры принималась равной 367 К [100].

На рис. 2.16 приведена зависимость эффективной площади телескопа РТ-22 от угла места H. Для практического использования методом наименьших квадратов A_{eff} определена в виде $A_{eff}(H) = (6.9 \pm 0.4) + (0.83 \pm 0.05) \cdot H$, где A_{eff} выражено в м², H в градусах.



Рис. 2.16. Зависимость эффективной площади телескопа РТ-22 от угла места. Точками показаны значения эффективной площади, полученные из наблюдений, сплошной линией показана их аппроксимация прямой

Одной из целей этих исследований является оценка изменений параметров телескопа со временем. Для этого мы приводим результаты аналогичных измерений эффективной площади телескопа РТ-22, проведенных в 1977-1979 годах в сравнении с результатами 2007 г (рис. 2.17). Из рисунка видно, что разница между эффективной площадью 1979 и 2007 годов незначительна. Следовательно, качество поверхности главного зеркала телескопа практически осталось неизменным.



Рис. 2.17. Зависимости эффективной площади РТ-22 от угла места в 1979 и 2007 годах.

Коэффициент использования диаграммы направленности (КИДН) для данного типа антенны может быть выражен в виде [101]:

$$B_{eff} = \frac{T_a'}{T_b} \cdot \frac{1}{1 - \exp(-z^2)} \cdot 100\%$$
(2.8)

Зависимость КИДН от угла места показаны на рис. 2.18.



Рис. 2.18. Зависимость коэффициента использования диаграммы направленности от угла места.

Зависимость КИДН от угла можно представить выражением, полученным по данным наблюдения

 $B_{eff}(H) = [(0.03 \pm 0.007) + (0.004 \pm 0.0009) \cdot H] \cdot 100$, где B_{eff} выражено в процентах, H в градусах.

Измерения показали, что эффективная площадь на высоких углах места (около 70°) достигает ~ 80 м^2 . Эффективная площадь и коэффициент использования диаграммы направленности линейно уменьшается при уменьшении угла места телескопа. Предполагается, что причиной такой зависимости могут быть деформация главного зеркала и смещение фокуса контррефлектора относительно фокуса главного зеркала при наклоне антенны. Время наблюдений и выбор подбор источников проводились таким образом, чтобы измерения проводились при как можно больших углах места.

2.2.2. Определение параметров РТ-22 на частоте излучения молекулы ¹³СО (J=1-0)

Для вычисления физических параметров космических объектов из молекулы ¹³СО. данных наблюдений, проведенных в линии J=1-0 необходимо знание параметров радиотелескопа на этой частоте. Методика определения параметров РТ-22 на частоте 110,2 ГГц аналогична описанной выше для частоты 87,7 ГГц. Ширина диаграммы направленности на уровне половинной мощности определялась из сканов планеты Марс. Ее величина составила $\theta_h = 36'' \pm 2''$. Коэффициент использования диаграммы направленности был определен из наблюдений планеты Юпитер. Наблюдения, проведенные в диапазоне углов высоты от 45⁰ до 60⁰ показали, что в этом диапазоне КИДН = 0.15 при относительной погрешности измерений 7%. Анализ многолетних спектральных наблюдений источника IRAS 22267+6244, проведенных в разное время суток в этом диапазоне углов, показывает, что относительная погрешность рассчитанной яркостной температуры, проинтегрированной по всему профилю линии, составляет 10%.

Выводы к разделу 2

Радиотелескоп РТ-22 оснащен новым приемным комплексом, позволяющим проводить радиоастрономические наблюдения в миллиметровом диапазоне длин волн. В рамках этой работы соискателем были созданы следующие устройства:

- Создан Фурье-спектроанализатор, предназначенный для проведения радиоастрономических наблюдений. Полоса анализа составляет либо 8 МГц либо 10 МГц либо 14 МГц с количеством каналов либо 512 либо 2048 либо 8192 в зависимости от выбранного режима наблюдений.
- Создана система управления и сбора данных, которая осуществляет общее управление всем процессом проведения наблюдений, хранения и обработки полученных результатов, а также дает возможность проводить различные тесты приемного комплекса.

Измерены параметры параметры радиотелескопа РТ-22 в 3-х миллиметровом диапазоне длин волн. Исследования на частоте 87,7 ГГц показали, что качество поверхности главного зеркала телескопа РТ-22 в период с 1979 по 2007 год практически не изменилось. Наблюдения, проведенные в диапазоне углов высоты от 45° до 60° частоте 110,2 ГГц показали, что в этом диапазоне КИДН = 0.15.

РАЗДЕЛ 3.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНЫХ ПОТОКОВ

Как было указано в обзоре, в наблюдаемых спектрах излучения молекул низкоскоростная часть биполярных потоков проявляется в асимметрии профилей линий, появлении крыльев линий и в некоторых массивных источниках наблюдается систематический сдвиг всего профиля линии вдоль направления движения вещества. Из них сдвиг является наименее исследованным явлением, хотя он проявляется в наименее низкоскоростной части потока и ответственен за перенос значительных масс вещества.

В данном разделе представлен новый метод расчета параметров низкоскоростной части биполярных потоков (МНСБП) [36]. Метод учитывает все перечисленные проявления биполярного потока в спектрах линий (асимметрию профилей линий, наличии крыльев линий И профиля систематический сдвиг всего линии). В методе введено предположение, о том, что распределение скоростей в стационарном облаке является максвелловским, а биполярный поток имеет произвольную морфологию. На основе МНСБП разработан модифицированный метод расчета параметров низкоскоростной части биполярных потоков [41], который оптимизирован для определения параметров биполярных потоков в МЗО, где систематический сдвиг профиля линий выражен слабо. При этом метод также модифицирован для случаев с небольшим отношением сигналшум, что часто имеет место в наблюдаемых спектрах. Основные результаты данного раздела изложены в статьях [36, 41] и докладывались на международной конференции [37].

3.1. Метод определения низкоскоростных параметров биполярного потока (МНСБП)

На основе данных, полученных при картографировании МЗО в линии ¹³СО (J=1-0), метод определения низкоскоростных параметров биполярного потока позволяет рассчитать массу, импульс и энергию биполярного потока.

3.1.1. Исходные предположения

Наблюдения биполярных потоков со сдвигом всего профиля линии показали [35], что расположение синесмещенной/красносмещенной низкоскоростной компоненты части коррелируют с расположением синесмещенной/красносмещенной компоненты высокоскоростной части биполярных потоков. Это позволяет предположить, что наблюдаемый сдвиг есть следствием биполярного потока, а не вращательного движения вешества. Иначе ось ЭТОГО вращательного была бы движения перпендикулярна оси биполярного потока, что не физично.

Исходя из этого предполагается, что вещество в молекулярном облаке по характеру движения можно разделить на две части: стационарное облако биполярный поток. В стационарном облаке присутствует И только микротурбулентный движения вещества. Характеристики ТИП ЭТОГО движения постоянны во всех точках стационарного облака и определяются при исследовании области, расположенной вблизи биполярного потока, но не принадлежащей ему. Любое отклонение характера движения в молекулярном облаке от микротурбулентного рассматривается как проявление биполярного потока.

В МНСБП используется следующая концепция стационарного облака. В стационарном облаке с микротурбулентным типом движения вещества, распределение количества молекул по скоростям описывается функцией Гаусса с центральной скоростью v_0 и шириной на уровне $0.5 - \Delta v$. 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 υ в точке с координатами α и δ будет равна

$$T_{mb}^{s}\left(\upsilon,\tau_{\alpha\delta}^{s},\upsilon_{0}^{s},\Delta\upsilon_{0}^{s}\right) = \left(J(T_{ex}) - J(T_{bg})\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\tau'\right)\right),\tag{3.1}$$

где

$$\tau' = \tau_{\alpha\delta}^{s} \cdot \exp\left(-4\ln\left(2\right) \cdot \left(\frac{\upsilon - \upsilon_{0}^{s}}{\Delta \upsilon^{s}}\right)^{2}\right), \quad J(T) = 5.29 / \left(\exp(5.29 / T) - 1\right)$$

Здесь $\tau^s_{\alpha\delta}$ - оптическая толщина стационарного облака в направлении α и δ в центре линии. Все величины записаны для перехода J=1-0 молекулы ¹³CO. Эта же формула описывает профиль линии излучения стационарного облака, состоящего из идентичных фрагментов при предположении, что разброс скоростей фрагментов больше разброса скоростей газа внутри фрагмента. [102]. В данном выражении не используется предположения о малых значениях оптической толщины, так как в центре профиля линии J=1-0 ^{13}CO оптическая толщина молекулы порядка единицы. Излучение стационарного облака дает вклад в излучение, выходящее из молекулярного облака в любой точке. Параметры движения вещества v_0 и Δv постоянны и не зависят от α и δ . При этом величина $\tau^s_{\alpha\delta}$ определяется плотностью частиц и размерами облака на луче зрения для каждой позиции с координатами α и δ .

3.1.2. Алгоритм метода 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. [84]).

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. Из наблюдаемых спектров 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 ¹³CO, но метод может быть легко модифицирован для анализа других спектральных линий вращательных переходов молекулы ¹³CO.

Ниже описаны конкретные этапы расчета с использованием МНСБП

- 1. Построение карт интегральных интенсивностей красносмещенной и синесмещенной частей молекулярного облака.
- 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 с координатами α и δ аппроксимируются функцией (3.1) методом наименьших квадратов и находятся значения τ^s_{αδ}, υ_{0αδ} и Δυ_{αδ}. Усредненные по этим позициям величины τ^s, υ^s₀ и Δυ^s считаются параметрами стационарного облака.
- 3. Выбор диапазонов скоростей. Верхним пределом скорости синесмещенного компонента потока считается $\upsilon^b = \upsilon_0^s - \Delta \upsilon^s / 2$ Нижним . величина пределом скорости красносмещенного компонента считается потока величина $\upsilon^r = \upsilon_0^s + \Delta \upsilon^s / 2$. При уменьшении υ^r и увеличении υ^b рассчитанные параметры биполярного потока будут увеличиваться, но одновременно будет возрастать вклад шумов, которые присутствуют в

наблюдательных данных. Увеличение v^r и уменьшение v^b приводит к недооценке параметров биполярного потока.

4. Расчет яркостной температуры стационарного облака для всех позиций α и δ . Яркостная температура стационарного облака в направлении α и δ определяется формулой (3.1) $T_{mb}^{s} \left(v, \tau_{\alpha\delta}^{s}, v_{0}^{s}, \Delta v^{s} \right)$. v_{0}^{s} и Δv^{s} известны. $\tau_{\alpha\delta}^{s}$ нельзя определить непосредственно так, как это было сделано в пункте 2, поскольку излучение биполярного потока влияет на наблюдаемый профиль линии. Для определения $\tau_{\alpha\delta}^{s}$ вводится следующее приближение. В диапазоне скоростей $v^{b} \dots v^{r}$ влияние биполярного потока предполагается незначительным. Следовательно, яркостная температура в этом диапазоне скоростей описывается выражением (3.1) для любых α и δ . Тогда, поскольку $\tau_{\alpha\delta}^{s}$ прямо пропорциональна лучевой плотности молекул ¹³СО,

$$\tau_{\alpha\delta}^{s} = \tau^{s} \cdot \frac{N\left(T_{mb}\left(\upsilon,\alpha,\delta\right),\upsilon^{b},\upsilon^{r}\right)}{N\left(T_{mb}^{s}\left(\upsilon,\tau^{s},\upsilon_{0}^{s},\Delta\upsilon^{s}\right),\upsilon^{b},\upsilon^{r}\right)},\tag{3.2}$$

где

$$N(T, \nu^{\min}, \nu^{\max}) = \frac{2.42 \cdot 10^{14} \cdot (T_{ex} + 0.88)}{1 - \exp(-5.29/Tex)} \cdot \int_{\nu^{\min}}^{\nu^{\max}} \tau(T) d\nu, \qquad (3.3)$$

$$\tau(T) = -\ln\left(1 - \frac{T}{5.29/\left[\exp(5.29/T_{ex}) - 1\right] - 0.87}\right).$$
(3.4)

Здесь $T_{mb}(\upsilon, \alpha, \delta)$ - наблюдаемая яркостная температура на лучевой скорости υ на позиции с координатами α и δ . $N(T, \upsilon^{\min}, \upsilon^{\max})$ - функция, определяющая лучевую плотность молекул ¹³СО в диапазоне лучевых скоростей $\upsilon^{\min}...\upsilon^{\max}$, находящихся в состоянии термодинамического равновесия с температурой возбуждения T_{ex} , излучение которых описывается яркостной температурой T [33]. При

применении формулы (3.2) 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 $\tau^s_{\alpha\delta}$ уменьшалась до тех пор, пока не выполнялись условия

 $\frac{\int_{\upsilon}^{\upsilon^{b}} T_{mb}^{bo} \cdot d\vartheta}{\upsilon^{b} - \upsilon^{b1}} > -\sigma_{T_{mb}} \quad u \frac{\int_{\upsilon^{r}}^{\upsilon^{r1}} T_{mb}^{bo} \cdot d\vartheta}{\upsilon^{r1} - \upsilon^{r}} > -\sigma_{T_{mb}},$ где υ^{b1} - нижний предел скорости синей части потока, υ^{r1} верхний предел скорости красной части потока, δT_{mb} - среднеквадратичное отклонение наблюдаемой яркостной температуры, величина T_{mb}^{bo} описана ниже.

5. Расчет физических параметров биполярного потока. Для синего и красного компонента потока по формулам (3.3) и (3.4) рассчитываются лучевые плотности молекул ¹³CO. Для стационарного облака на позиции с координатами α и δ эти плотности определяются функциями $N(T^{s}_{mb}(\upsilon, \tau^{s}_{\alpha\delta}, \upsilon^{s}_{0}, \Delta \upsilon^{s}), \upsilon^{b1}, \upsilon^{b})$

и $N(T_{mb}^{s}(\upsilon,\tau_{\alpha\delta}^{s},\upsilon_{0}^{s},\Delta\upsilon^{s}),\upsilon^{r},\upsilon^{r1})$, где $\tau_{\alpha\delta}^{s}$ определяется способом, описанным в предыдущем пункте. Для молекулярного облака лучевые плотности записываются аналогично $N(T_{mb}(\upsilon,\alpha,\delta),\upsilon^{1b},\upsilon^{b})$ и $N(T_{mb}(\upsilon,\alpha,\delta),\upsilon^{r},\upsilon^{1r})$. Температура возбуждения T_{ex} полагалась равной яркостной температуре в центре профиля линии молекулы ¹²CO. Масса молекулярного и стационарного облаков рассчитывалась по формуле [30]

$$M_{gas}\left(T,\upsilon^{\min},\upsilon^{\max}\right) = \mu_g \cdot \frac{X(H_2)}{X(^{13}CO)} \cdot S_{flow} \cdot m_{H_2} \cdot \sum_{\alpha,\delta} N\left(T,\upsilon^{\min},\upsilon^{\max}\right), \quad (3.5)$$

где $\mu_g = 1,36$ – отношение всей массы газа к массе H₂, $\frac{X(H_2)}{X(^{13}CO)} = 5 \cdot 10^5$ отношение концентраций молекул H₂ к ¹³CO [83],

 S_{flow} - площадь биполярного потока, m_{H_2} - масса молекулы водорода. Суммирование ведется по всем точкам α и δ , в которых проявляется биполярный поток. В качестве яркостной температуры Т для расчета массы молекулярного облака используются экспериментальные данные $T_{mb}(\upsilon, \alpha, \delta)$, для стационарного облака – вычисленная по формуле 3.1 $T_{mb}^{s}(\upsilon, \tau_{\alpha\delta}^{s}, \upsilon_{0}^{s}, \Delta \upsilon^{s})$. υ^{\min} и υ^{\max} выбираются равными υ^{b1} , υ^{b} для синего компонента потока и υ^{1r} , υ^{r} для красного компонента потока. Разность между массами молекулярного облака И стационарного облака считалась массой биполярного потока. Импульс и энергия биполярного потока рассчитываются по формулам

$$P_{bo} = \sum_{j} \left(\upsilon_{j} - \upsilon_{0}^{s} \right) \cdot \left(M_{gas} \left(T_{mb} \left(\upsilon, \alpha, \delta \right), \upsilon_{i} - \frac{\Delta \upsilon_{c}}{2}, \upsilon_{i} + \frac{\Delta \upsilon_{c}}{2} \right) - M_{gas} \left(T_{mb}^{s} \left(\upsilon, \tau_{\alpha\delta}^{s}, \upsilon_{0}^{s}, \Delta \upsilon^{s} \right), \upsilon_{i} - \frac{\Delta \upsilon_{c}}{2}, \upsilon_{i} + \frac{\Delta \upsilon_{c}}{2} \right) \right)$$

$$E_{bo} = \frac{1}{2} \sum_{j} \left(\upsilon_{j} - \upsilon_{0}^{s} \right)^{2} \cdot \left(M_{gas} \left(T_{mb} \left(\upsilon, \alpha, \delta \right), \upsilon_{i} - \frac{\Delta \upsilon_{c}}{2}, \upsilon_{i} + \frac{\Delta \upsilon_{c}}{2} \right) - M_{gas} \left(T_{mb}^{s} \left(\upsilon, \tau_{\alpha\delta}^{s}, \upsilon_{0}^{s}, \Delta \upsilon^{s} \right), \upsilon_{i} - \frac{\Delta \upsilon_{c}}{2}, \upsilon_{i} + \frac{\Delta \upsilon_{c}}{2} \right) \right)$$

$$(3.6)$$

$$M_{gas} \left(T_{mb}^{s} \left(\upsilon, \tau_{\alpha\delta}^{s}, \upsilon_{0}^{s}, \Delta \upsilon^{s} \right), \upsilon_{i} - \frac{\Delta \upsilon_{c}}{2}, \upsilon_{i} + \frac{\Delta \upsilon_{c}}{2} \right) \right)$$

где Δv_c - ширина одного канала спектроанализатора, выраженная в терминах лучевой скорости. Суммирование по *j* ведется в диапазонах, соответствующих лучевым скоростям v^{b1} , v^b для синего компонента потока и v^{1r} , v^r для красного компонента 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 биполярного потока в каждом спектральном канале на каждой позиции с координатами α и δ :

$$T_{mb}^{bo}(\upsilon,\alpha,\delta) = \left(J(T_{ex}) - J(T_{bg})\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\tau\left(T_{mb}(\upsilon,\alpha,\delta)\right) - \tau\left(T_{mb}^{s}\left(\upsilon,\tau_{\alpha\delta}^{s},\upsilon_{0}^{s},\Delta\upsilon^{s}\right)\right)\right)\right)\right).$$
(3.8)

Полученные таким образом профили линий биполярного потока в дальнейшем были использованы для построения карт биполярных потоков и для выравнивания базовой линии в модернизированном МНСБП.

3.2. Модифицированный метод расчета параметров низкоскоростной части биполярных потоков молодых звездных объектах.

Модифицированный метод расчета параметров низкоскоростной части биполярных потоков представляет собой развитие метода МНСБП для изучения низкоскоростных биполярных потоков, оптимизируя его для определения параметров биполярных потоков в МЗО, где систематический сдвиг профиля линий выражен слабо. При этом метод также модифицирован для случаев с небольшим отношением сигнал-шум, что часто имеет место в наблюдаемых спектрах.

В методе МНСБП вводится предположение, согласно которому в диапазоне скоростей $v^b \dots v^r$ влияние биполярного потока предполагается незначительным. При обработке реальных спектров в случае нарушения этого предположения, может возникнуть ситуация при которой вычисленный спектр биполярного потока в некотором диапазоне лучевых скоростей может опуститься в область отрицательных значений. Для уменьшения этого эффекта в методе МНСБП введена коррекция рассчитанного $\tau^s_{\alpha\delta}$, которая требует выполнения условий $\frac{\int_{v^{b}}^{v^{b}} T_{mb}^{bo} \cdot d\theta}{v^{b} - v^{b1}} > -\sigma_{T_{mb}}$ и $\frac{\int_{v^{r}}^{v^{r_{1}}} T_{mb}^{bo} \cdot d\theta}{v^{r_{1}} - v^{r}} > -\sigma_{T_{mb}}$. Такой подход дает удовлетворительное решение в большинстве случаев. Но при сильной зашумленности изрезанности или спектра несколько последовательных значений величины T_{mb}^{bo} могут принимать отрицательные

значения, величина которых зависит от $\sigma_{T_{mb}}$. При небольших величинах шума $\sigma_{T_{mb}}$ этот эффект слабо влияет на величину определяемых массы и кинетической энергии биполярного потока. Но он приводит к значительной ошибке при плохом отношении сигнал шум.

В модифицированном МНСБП используется принципиально другой механизм определения $\tau_{\alpha\delta}^s$. Здесь основное внимание уделено определению и выравниванию базовой линии рассчитанного спектра биполярного потока. При этом снижается влияние зашумленности исходного спектра, что в свою очередь дает возможность рассчитывать параметры биполярных потоков в M3O, у которых систематический сдвиг профиля линий мал и масса потока мала.

3.2.1. Алгоритм модернизированного метода расчета параметров низкоскоростной части биполярных потоков

Метод используется для расчета массы, импульса и энергии биполярных потоков, по наблюдательным данным картографирования молекулярного облака в линии молекулы ¹³CO (J=1-0). Предполагается, что молекулярное облако состоит из стационарного облака и биполярного потока. Для каждой точки наблюдения с координатами α и δ рассчитываются спектры стационарного облака и спектры, соответствующие биполярному потоку, и затем по ним определяются параметры биполярного потока.

При этом используются следующие допущения:

- температуры возбуждения стационарного облака и биполярного потока считаются одинаковыми и постоянными во всем МЗО;
- рассчитывается нижний предел параметров биполярного потока;
- вещество в стационарном облаке и биполярном потоке находится в состоянии ЛТР.

Первое допущение накладывает ограничение на максимальную величину интенсивности излучения стационарного облака. Она не может

быть больше интенсивности излучения молекулярного облака. А из второго допущения следует, что интенсивность излучения стационарного облака должна быть максимально возможной. При таких допущениях в отсутствие шумов профиль линии излучения стационарного облака должен касаться в некоторой области лучевых скоростей профиля линии молекулярного облака (рис. 3.1а). В действительности спектр «загрязнен» шумами, которые возникают в атмосфере и в приемной аппаратуре (рис. 3.1б). Естественно, необходимо минимизировать влияния шумов на точность определения массы и энергии биполярных потоков.



Рис. 3.1. Идеализированный спектр молекулярного облака при отсутствии шумов (сплошная линия на рис. а), реальный спектр молекулярного облака (сплошная линия на рис. б), спектр стационарного облака (пунктирная линия на рис. а, б).

В модернизированном МНСБП стационарное облако представлено следующим образом. Профиль линии излучения стационарного облака также как и в МНСБП описывается формулой (3.1). В МНСБП значения v_0^s и Δv^s определялись из спектров, которые расположены в окрестности биполярного потока. В модернизированном методе такой подход применяется для поиска начальных приближений v_0^s и Δv^s . Окончательные их значения рассчитываются, исходя из следующих положений. Предполагается, что величина v_0^s одинакова во всем молекулярном облаке и определяется исходя из минимума рассчитываемой массы биполярного потока, при этом оставаясь

в пределах своей погрешности. $\Delta \upsilon^s$ может изменяться от спектра к спектру и определяется исходя из минимума рассчитываемой массы биполярного потока.

Таким образом, алгоритм модернизированного МНСБП можно разбить на две части. В первой части вычисляется оптическая толщина стационарного облака $\tau_{\alpha\delta}^s$ и масса биполярного потока $m_{\alpha\delta}$ для спектра, снятого в точке с координатами α и δ , при фиксированных значениях v_0^s и Δv^s . Во второй части, используя условие минимума массы $m_{\alpha\delta}$, рассчитываются окончательные значения v_0^s и Δv^s , спектры, стационарного облака и биполярного потока и параметры биполярного потока.

Вычисление параметров биполярного потока при фиксированных значениях υ_0^s и $\Delta \upsilon^s$. Как видно из формулы (3.1), при фиксированных υ_0^s и $\Delta \upsilon^s$ для определения спектра стационарного облака и параметров биполярного потока необходимо определить только величину $\tau_{\alpha\delta}^s$. Исходя из допущений, приведенных в предыдущем пункте, для каждого спектра, в точке наблюдения α и δ , применяется итерационный алгоритм, цель которого найти максимально возможное положительное значение $\tau_{\alpha\delta}^s$, при котором для всех рассчитанных $T_{mb}^{bo}(\upsilon)$ для υ , принадлежащей диапазону $\upsilon^{b1} \dots \upsilon^{r1}$, выполняется одно из условий

$$\begin{cases} T_{mb}^{bo}\left(\upsilon,\tau_{\alpha\delta}^{s},\upsilon_{0},\Delta\upsilon\right)-T_{mb}(\upsilon)\geq-\eta_{e}\cdot\sigma_{T_{mb}}\\ T_{mb}^{bo}\left(\upsilon,\tau_{\alpha\delta}^{s},\upsilon_{0},\Delta\upsilon\right)\geq-\eta_{T}\cdot\sigma_{T_{mb}} \end{cases},$$
(3.9)

где $T_{mb}(\upsilon)$ яркостная температура молекулярного облака (в экспериментально полученных спектрах), η_T и η_e коэффициенты, которые определяют массив спектральных каналов, участвующих в аппроксимации исходного спектра и окончательном определении $\tau_{\alpha\delta}^s$. $\sigma_{T_{mb}}$ -

среднеквадратичное отклонение яркостной температуры, рассчитанной в области спектра, где отсутствует сигнал от источника.

Первое условие является вспомогательным, но оно определяет массив значений яркостных температур для нахождения искомого $\tau^s_{\alpha\delta}$ С использованием второго условия. На рис. 3.2 показан характерный вид экспериментально полученного спектра молекулярного облака в окрестности источника IRAS 22267+6244 (сплошная линия) и три рассчитанных методом МНСБП спектра биполярного потока $T_{mb}^{bo}(\upsilon)$ при $\eta_T = 0.2$ (черные точки), $\eta_T = 1$ (квадраты) и $\eta_T = 3$ (треугольники). Для $\eta_e = 1$ символом υ' обозначен интервал лучевых скоростей, в котором первое условие не выполняется и искомое $\tau^s_{\alpha\delta}$ определяется вторым условием. Исследование зависимости рассчитываемой массы биполярного потока от η_e показало, что при $\eta_e \ge 0.5$, масса биполярного потока имеет слабую зависимость от η_e . В расчетах η_e принималось равной 1.



Рис. 3.2. Спектр линии ¹³СО (J=1-0) в одной из точек молекулярного облака в окрестности источника IRAS 22267+6244 (сплошная линия) и три рассчитанных методом МНСБП спектра биполярного потока $T_{mb}^{bo}(\upsilon)$ при $\eta_T = 0.2$ (черные точки), при $\eta_T = 1$ (квадраты) и при $\eta_T = 3$ (треугольники).

Из рис. 3.2 видно, что в интервале наблюдаемых лучевых скоростей в $T_{mb}^{bo}(\upsilon)$ можно выделить сигнал от биполярного потока и базовую линию. Базовая линия на интервале υ' должна иметь математическое ожидание равное 0, такое же, как и вне этого диапазона. Количество спектральных каналов в базовой линии обозначим как *n*. Второе условие основано на предположении, что T^{bo}_{mb} не может быть меньше значения $-\eta_T \cdot \sigma_{T_{mb}}$ и описывает уровень базовой линии спектра излучения биполярного потока T^{bo}_{mb} внутри интервала υ '. При увеличении η_T базовая линия T^{bo}_{mb} изгибается и опускается в область отрицательных значений (рис. 3.2). Очевидно, что для η_T существует некий оптимум, при котором математическое ожидание базовой линии T_{mb}^{bo} внутри интервала υ' приближается к 0. Этот оптимум достигается при выполнении следующего условия: P₁ - вероятность того, что *п* последовательных значений яркостной температуры в базовой линии T_{mb}^{bo} имеют значения выше, чем – $\eta_T \cdot \sigma_{T_{mh}}$, должна быть равна вероятности того, что хотя бы одно из этих значений менее $-\eta_T \cdot \sigma_{T_{mb}}$. А так как эти два события составляют полную группу событий, то $P_1 = 0.5$. Наблюдательные спектры в областях лучевых скоростей, где нет сигнала, могут быть интерпретированы как дискретный шумовой сигнал. Исследование характеристик этого сигнала показало, что плотность распределения вероятности шума близка К нормальной плотности вероятности. Следовательно, вероятность выпадения ОДНОГО значения яркостной

температуры в диапазоне
$$-\eta_T \cdot \sigma_{T_{mb}} \dots \infty$$
 равна $p = \int_{-\eta_T \sigma}^{\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx$.

В предположении о независимости детектирования сигнала в каждом спектральном канале спектранализатора вероятность того, что *n* последовательных значений яркостной температуры имеют значения выше, чем $-\eta_T \cdot \sigma_{T_{mb}}$ равна $P_1 = p^n = 0.5$. Решение этого уравнения дает

зависимость $\eta_T(n)$, которая показана на рис. 3.3. На практике базовая линия наблюдается в нескольких спектральных каналах, и их число может изменяться от спектра к спектру. Таким образом, можно утверждать, что величина η_T должна быть порядка 1. На данном этапе для каждого спектра, наблюдаемого в точке α и β , проводится расчет $\tau^s_{\alpha\delta}$ и спектра биполярного потока $T^{bo}_{mb}(\upsilon)$ для $\eta_T = 1$ и $\eta_e = 1$.



Рис. 3.3. Зависимость оптимального коэффициента η_T от количества спектральных каналов в базовой линии $T_{mb}^{bo}(\upsilon)$, находящихся в диапазоне υ' .

Неопределенность в η_T , описанная в выше, может являться причиной погрешности в определении параметров биполярного потока. Для снижения величины этой погрешности дальнейший алгоритм модернизированного метода МНСБП строится таким образом, чтобы конечный результат (в данном случае масса биполярного потока) имел слабую зависимость от η_T . Для этого окончательные значения $\tau^s_{\alpha\delta}$ ищутся с помощью метода наименьших квадратов. Вначале определяется массив данных лучевых скоростей υ_i , которые участвуют при определении $\tau^s_{\alpha\delta}$. В этот массив включаются те спектральные каналы, в которых найденные выше значения

биполярного потока яркостных температур подчиняются условию $T^{bo}_{mb}(\upsilon_i) < 2 * \sigma_{T_{mb}}$. Затем значения экспериментально полученных спектров молекулярного облака, соответствующие массиву v_i используются значения $\tau^s_{\alpha\delta}$ вычисления окончательного помощью метода ДЛЯ С аппроксимирующей наименьших квадратов. B качестве функции функция (3.1),у которой только неизвестный используется ОДИН параметр $\tau^s_{\alpha\delta}$. Используя найденное $\tau^s_{\alpha\delta}$, рассчитываются спектры стационарного облака и биполярного потока. На рис. 3.4 показаны спектр линии ¹³CO (J=1-0) в одной из точек молекулярного облака в окрестности источника IRAS 22267+6244 (сплошная линия), спектр стационарного облака, (пунктирная линия) и результирующий спектр биполярного потока (точки). Белыми треугольниками показаны $T^{bo}_{mb}(\upsilon)$, которые участвовали в формировании спектра стационарного облака. При расчетах предполагалось,



Рис. 3.4. Спектр линии ¹³СО (J=1-0) в одной из точек молекулярного облака в окрестности источника IRAS 22267+6244 (сплошная линия), спектр стационарного облака, полученный с помощью метода наименьших квадратов (пунктирная линия), спектр биполярного потока (точки). Белыми треугольниками показаны значения антенных температур $T_{mb}(v_i)$ исходного спектра молекулярного облака, которые участвуют при определении спектра стационарного облака.

что $v_0 = -2.5 \text{ и} \Delta v = 1.7$. Из Рис. 3.4 видно, что базовая линия биполярного потока параллельна оси лучевой скорости VLSR, и ее математическое ожидание близко к 0. Расчет массы биполярного потока по известным спектрам биполярного потока также, как и в методе МНСБП.

При таком подходе рассчитанная масса молекулярного потока значительно меньше зависит от η_T , чем в решении, полученном без применения метода наименьших квадратов. Это проиллюстрировано на рис. 3.5, где приведена зависимость массы биполярного потока M3O IRAS 05345+3157 от η_T . Треугольниками обозначена масса биполярного потока, рассчитанная с использованием метода наименьших квадратов для поиска окончательных значений $\tau_{\alpha\delta}^s$, черными точками – без его применения.



Рис. 3.5. Зависимость биполярного M30 массы потока IRAS 05345+3157 OT η_T Треугольниками обозначена . масса биполярного потока, рассчитанная с применением метода наименьших квадратов для поиска окончательных значений $\tau_{\alpha\delta}^s$, черными точками – без применения.

Определение v_0^s и Δv^s и расчет параметров биполярного потока. Значения величин v_0^s и Δv^s рассчитываются исходя из минимума массы биполярного потока. При этом не накладывается никаких ограничений относительно величины $\Delta \upsilon^s$ и она определяется отдельно для каждого спектра. Поскольку одним из основных назначений это метода является расчет параметров биполярного потока МЗО, в котором присутствует систематический сдвиг всего профиля линии, предполагается, что υ_0^s одинакова во всем молекулярном облаке и может меняться только в пределах своей погрешности. Поскольку новый алгоритм более устойчив к шумам, содержащимся в экспериментально полученных спектрах, то верхним пределом скорости синесмещенного компонента и нижним пределом скорости красносмещенного компонента потока принимается υ_0^s .

расчета параметров низкоскоростной Алгоритм метода части биполярных потоков следующий. Строятся карты интегральных интенсивностей красносмещенной и синесмещенной частей молекулярного облака и определяются точки, не принадлежащие биполярному потоку. Профили линий в этих точках аппроксимируются функцией (3.1) методом наименьших квадратов и рассчитываются усредненные по этим точкам величины $\overline{\upsilon}_0^s$ и $\Delta\overline{\upsilon}$, а также среднеквадратичное отклонение $\sigma_{\!\scriptscriptstyle \mathcal{V}^s_0}$ величины $\overline{\upsilon}_0^s$. Используя методику расчетов массы биполярного потока, для каждого спектра описанную в предыдущем подразделе, и условие минимума массы биполярного потока, рассчитываются окончательные значения $\Delta \upsilon_{\alpha\delta}$ и v_0^s . При этом $\Delta v_{\alpha\delta}^s$ рассчитывается отдельно для каждого спектра и в качестве критерия использовался минимум массы биполярного потока $m_{\alpha\delta}$, которая определялась для одного спектра. Расчет $\Delta v_{\alpha\delta}^s$ осуществляется методом равномерного поиска. Центральная скорость v_0^s стационарного облака считается одинаковой для всего облака и в качестве критерия использовался минимум суммы $m_{\alpha\delta}$ по всем координатам α и δ , соответствующих биполярному потоку. Область определений для $\Delta v^s_{\alpha\delta}$ не ограничивается. Диапазон, в котором рассчитывается v_0^s , ограничен

пределами от $\overline{\upsilon}_{0}^{s} - \frac{\sigma_{\upsilon_{0}^{s}}}{2}$ до $\overline{\upsilon}_{0}^{s} + \frac{\sigma_{\upsilon_{0}^{s}}}{2}$. По известным $\tau_{\alpha\delta}^{s}$, $\Delta \upsilon_{\alpha\delta}^{s}$ и υ_{0}^{s} рассчитываются спектры стационарного облака и биполярного потока.

Расчет параметров биполярного потока по известным спектрам биполярного потока проводится по алгоритму, используемому в методе МНСБП.

На рис. 3.6 показаны примеров расчетов модернизированным МНСБП спектров стационарного облака и спектров биполярного потока в отдельных точках в источнике IRAS 22267+6244. На рис. 3.6 в 4-х точках молекулярного облака сплошной линией показаны наблюдаемые профили линий излучения 13 CO (J=1-0), штриховым пунктиром показаны рассчитанные профили линий стационарного облака, точками изображены профили линий излучения биполярного потока. Относительные координаты каждой точки α и δ в угловых минутах дуги указаны в левом верхнем углу каждого графика. Позиции (-1', 1') и (1', -1') соответствуют максимумам красносмещенного и синесмещенного компонента биполярного потока, позиция (-4', -2') – на краю молекулярного облака, вне зоны биполярного потока. Щирина линии стационарного облака рассчитывалась индивидуально для каждого спектра по описанной выше методике.

Из рис. 3.6 видно, что хорошее 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.

Сравнение результатов, полученных модернизированным методом МНСБП и методом, описанным в работе [35] проводились для случая, в котором красносмещенный и синесмещенный спектры симметричны (в соответствии с приближением, введенным в работе [35]). Найдено, что решения, полученные обоими методами в данном случае практически идентичны.



Рис. 3.6. Примеры использования модернизированного метода МНСБП для анализа наблюдаемых профилей линии в различных точках источника IRAS 22267+6244. Профили линий J=1-0молекулы ¹³CO, соответствующие молекулярному облаку (сплошная линия), стационарному облаку (штриховой пунктир) и биполярному потоку (точки), полученные для различных точек источника IRAS 22267+6244. Относительные координаты каждой точки α и δ в угловых минутах дуги указаны в правом верхнем углу каждого графика. Позиции (-1', 1') и (1', -1') соответствуют максимумам красносмещенного и синесмещенного компонента биполярного потока соответственно. Позиция (0', 0') расположена вблизи центра биполярного потока, позиция (-4', -2') - на краю молекулярного облака, вне зоны биполярного потока.

3.2.2. Погрешность определения массы и энергии биполярного потока ASO1 в объекте G122.0-7.1, вызванная наличием шумов в экспериментальных спектрах

Шумы, присутствующие в наблюдательных данных, оказывают влияние на конечный результат расчетов и, в частности на массу и энергию биполярного потока. В данной работе влияние шумов оценивается на примере конкретного биполярного потока ASO1 в источнике G122.0-7.1.

На первом этапе оценивалось влияние шумов при расчете параметров биполярного потока из спектров биполярного потока. Для этого по рассчитанным модернизированным методом МНСБП вычислялась масса биполярного потока в различных диапазонах лучевых скоростей. При этом $\upsilon^{b1} = \upsilon_0^s - \frac{\Delta \upsilon_1}{2}$, $\upsilon^{r1} = \upsilon_0^s + \frac{\Delta \upsilon_1}{2}$. На рис. 3.7 представлена зависимость массы биполярного потока от параметра Δv_1 . Из рис. 3.7 видно, что при что объясняется $\Delta v_1 < 5$ macca растет, присутствием излучения молекулярного облака в этом диапазоне скоростей. При $\Delta v_1 > 5$ все порождаются шумами, присутствующими изменения массы В наблюдательных спектрах. Интерпретируя зависимость массы от Δv_1 в области $\Delta v_1 > 5$ шумовой сигнал, как установлено, что его среднеквадратичное отклонение составляет ~2% от массы биполярного потока.

Предыдущий подход не учитывает влияния шумов на формирование спектров биполярного потока. Для получения этой оценки использовалась следующая методика.

Погрешность, которая вызвана шумами в наблюдаемых спектрах в каждой точке с координатами α и δ , можно определить, сравнивая рассчитанные с их помощью параметры биполярных потоков с параметрами,



Рис. 3.7. Зависимость массы биполярного потока в источнике G122.0-7.1 (ASO1) от параметра Δv_1 .

найденными с использованием спектров, в которых шум пренебрежимо мал. Поскольку уменьшить шум в экспериментальных спектрах нельзя, в качестве последних использовались усредненные спектры. Молекулярное облако делится на три области – область, в которой доминирует красносмещенный компонент биполярного потока, область, В которой доминирует синесмещенный компонент биполярного потока, и оставшаяся часть облака. Для каждой из областей все спектры, относящиеся к каждой области, суммируются самым определяются усредненные И тем спектры. Усредненные спектры обладают низкими по сравнению с исходными спектрами шумами.

Ко всем трем спектрам добавляется смоделированный шумовой сигнал с такой же, как и для наблюдаемых сигналов, нормальной плотностью вероятности. Выбираемая величина среднеквадратичного отклонения смоделированного шума была существенно больше, чем среднеквадратичное отклонение усредненных спектров. Затем рассчитывается среднеквадратичное отклонение $\sigma_{T_a^*}$ суммарных спектров. По этим спектрам для каждого значения $\sigma_{T_a^*}$ с применением метода модернизированного

МНСБП вычисляются массы M_K и энергии E_K биполярного потока. Для уменьшения погрешности вычислений, связанной с конкретной реализацией добавляемого шума, эти расчеты проводятся статистически обоснованное число раз.

Таким образом, для каждого $\sigma_{T_a^*}$ определяются ряд значений массы M_K и энергии E_K биполярного потока. Затем рассчитываются статистические характеристики этих рядов – математические ожидания \overline{M} , \overline{E} среднеквадратичные отклонения σ_M , σ_E и относительные погрешности $\delta_M = \sigma_M / \overline{M}$ и $\delta_E = \sigma_E / \overline{E}$.



Рис. 3.8. Зависимости относительной погрешности массы δ_M (точки) и энергии δ_E (треугольники) биполярного потока от среднеквадратичного отклонения антенной температуры σ_{T^*} .

На рис. 3.8 показаны зависимости относительной погрешности массы (точки) и энергии δ_E (треугольники) биполярного потока δ_M OT среднеквадратичного отклонения антенной температуры $\sigma_{T_a^*}$ Среднеквадратичное отклонение каждого из трех усредненных спектров ~ 0.1 К. что значительно меньше, чем среднеквадратичное отклонение смоделированного шума. Средняя величина среднеквадратичного отклонения наблюдаемых спектров в объекте ASO1 равна σ_{T^*} =0,26 К. Из рис. 3.8 видно, что при $\sigma_{T_a^*}=0,26$ К применение модернизированного МНСБП

приводит к относительным погрешностям массы биполярного потока ~15% и энергии биполярного потока ~20%.

Найденная погрешность в определении массы (15%) при таком подходе значительно больше, чем погрешность, полученная при расчете параметров биполярного потока из спектров биполярного потока (2%). Следовательно, результирующая погрешность практически полностью определяется влиянием шумов на формирование спектров биполярного потока.

Выводы к разделу 3

Разработан новый метод расчета параметров биполярного потока в областях звездообразования В массивных молекулярных облаках. Основываясь на данных картографирования молекулярного облака, он эффективно выделяет микротурбулентную составляющую движения в молекулярном облаке и позволяет рассчитать спектры стационарного облака и биполярного потока. В отличие от существующих методов, МНСБП адаптирован для расчета параметров потоков в объектах, где средняя облака скорость плотного ядра систематически сдвигается вдоль направления оси потока, а также не требует условия симметричности окружающего облака относительно центра потока. Метод позволяет определить массу и энергию всего облака в целом и его синесмещенного и красносмещенноного биполярных компонентов. Метод применен для анализа линий молекулы ¹³CO (J=1-0), хотя может быть легко адаптирован для анализа линий других молекул.

Для биполярного потока ASO1 в объекте G122.0-7.1 проведен анализ влияния шумов на точность определения массы и энергии. Показано, что при достигнутой в наблюдаемых спектрах величине среднеквадратичных отклонений сигнала из-за шумов (RMS) 0,26 К, ошибка в расчетах массы биполярного потока составляет ~15%, а энергии ~20%.

РАЗДЕЛ 4. БИПОЛЯРНЫЕ ПОТОКИ В МОЛОДЫХ ЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТАХ

В процессе выполнения работы был проведен поиск биполярных потоков, которые в линиях молекулы ¹³СО проявляются в основном в виде систематического сдвига профиля линии вдоль оси потока. Для поиска были отобраны объекты, в которых ранее наблюдались потоки в линии ¹²СО. Всего в линии ¹³СО (J=1-0) было картографировано более 10 потоков, в половине из которых был зарегистрирован сдвиг профиля линии. Объекты IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 и G122.0-7.1 были отобраны для дальнейшего анализа.

В данном подразделе описаны биполярные потоки в объектах IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 и G122.0-7.1 и приведены их параметры. Определение параметров биполярных потоков в источниках IRAS 05345+3157 и IRAS 22267+6244 проводилось методом МНСБП. Параметры потока в источнике G122.0-7.1 рассчитаны модернизированным МНСБП. Исследования высокоскоростной части биполярного потока представлены наблюдениями объекта G122.0-7.1 в линии ¹²CO (J=1-0) и последующим анализом наблюдательных данных.

Основные результаты данного раздела изложены в статьях [36, 38, 40, 41] и докладывались на международных конференциях [37, 39].

4.1. Биполярный поток в области звездообразования IRAS 05345+3157

Область звездообразования AFGL 5157 в окрестности IRAS 05345+3157 известна как массивный молодой звездный объект, который в течение ряда лет исследовался многими авторами. В нем зарегистрировано две отражательные туманности, NGC1985 и GM39 [103], проведены континуальные наблюдения на длине волны 3,6 см [104],

зарегистрирован мазер в лини 6_{16} - 5_{23} молекулы воды [104], получены карты в линии HCO+ (1–0) [105]. В последнее время с помощью интерферометров активно исследуется ядро этого объекта. В работе [106] область IRAS 05345+3157 исследовалась в линии молекулы N₂D+. Показано, что источник состоит из двух конденсаций с массами 2 и 9 M_{\odot} , 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 CO в 1988 году [107]. Затем аналогичные исследования с более высоким угловым разрешением были проведены в линии J=2-1 молекулы CO [4, 65]. В 2009 году были опубликованы результаты наблюдений IRAS 05345+3157, проведенных на интерферометре SMA с высоким угловым разрешением ($2.87"\times3.6"$) [108]. В этой работе исследовался переход J=2-1 молекул ¹²CO и ¹³CO. Во всех случаях было проведено картографирование объекта и определены параметры биполярного потока по линиям молекулы ¹²CO. Данные исследования, проведенные в линии J=1-0 молекулы ¹³CO, относятся к низкоскоростной части биполярного потока.

Источник IRAS 05345+3157 имеет координаты $RA(2000) = 05^{h} 37^{m}$ 47^s.8 и DEC(2000) = 31° 59' 24". Все карты этого источника, приведенные в данной работе, центрированы относительно этих координат.

4.1.1. Наблюдения

Картографирование области IRAS 05345+3157 в линии J=1-0 молекулы ¹³СО проводились в период с 27 сентября по 13 октября 2009 года на радиотелескопе РТ-22 КрАО. При наблюдениях использовался криогенный приемник 3-миллиметрового диапазона длин волн с шумовой температурой ~100 К. Шумовая температура системы в режиме однополосного приема сигнала составляла около 500-600 К в зависимости от погодных условий и угла поднятия источника над горизонтом. В качестве регистрирующего устройства использовался 512-ти канальный Фурье спектроанализатор и полосой обзора 14 МГц. Для увеличения отношения сигнал/шум

наблюдательные данные приводились к спектральному разрешению 112 кГц (0.3 км/с). Наблюдения проводились в режиме «наведение-отвод». Время накопления в каждой точке составляло 12 минут. При этом характерное среднеквадратичное отклонение наблюдаемой антенной температуры T_A^* составляло 0.2 К. Коэффициент использования диаграммы направленности антенны определялся по наблюдениям планеты Юпитер. Его величина для частоты 110 ГГц составила 0.15. Калибровка проводилась по черному телу стандартным методом, описанным в работе [97].

4.1.2. Характер движения вещества в области IRAS 05345+3157

Анализ профилей линий J=1-0 молекулы ¹³СО области IRAS 05345+3157 показал, что центральные части линий отличаются в различных областях молекулярного облака (рис. 4.1). Наиболее сильно это отличие проявляется юго-восточной и северо-западной областях. Карты



Рис. 4.1. Профили линий, снятые на различных позициях молекулярного облака. Сплошной линией показан профиль линии в точке с координатами (-0.53', 1.5'), пунктирной линией профиль линии в точке с координатами (1.06', 0').

красносмещенной и синесмещенной компонент показали биполярный характер этого отличия (рис. 4.2). Сравнение этих карт с картами биполярного потока, приведенными в работах [4, 107] выявило близкое расположение красносмещенного и синесмещенного компонент излучения молекул 12 CO и 13 CO. Эти смещения не могут быть связаны с сжатием

(расширением) молекулярного облака, так как в этом случае не должно наблюдаться пространственно разнесенных биполярных компонент. Признаков вращения облака, которое может быть второй причиной смещения центра линии, также не обнаружено.

На рис. 4.2 изображено пространственное распределение центральной скорости (рис. 4.2 а) и ширины линии на уровне 0.5 (рис. 4.2 б), полученных при аппроксимации каждого профиля функцией Гаусса. Эти результаты показаны фоновым серым цветом. Штрих-пунктирными и сплошными линиями даны изображения интегральных интенсивностей красносмещенной и синесмещенной частей молекулярного облака. Области наибольших изменений параметров линии совпадает с областями, где расположен биполярный поток. При этом смещение центральной скорости происходит, в основном, в направлении распространения биполярного потока (рис. 4.2 а). В северо-восточной и юго-западной части карты, где биполярный поток отсутствует, центральная скорость меняется незначительно. Аналогичная



Рис. 4.2. Карта пространственного распределения центральной скорости (а) и ширины (б) линии ¹³CO (J=1-0) в области IRAS 05345+3157. Контуры интегральной интенсивности красносмещенной и синесмещенной части молекулярного облака показаны толстыми линиями - пунктиром и сплошной соответственно. Контуры проведены на уровне 0,5 от максимальных значений. Фоновым цветом показано распределение центральной скорости (рис. а) и ширины линии на уровне ¹/₂ (рис. б), полученных из аппроксимации наблюдаемых спектров функцией Гаусса.

ситуация имеет место для распределения ширин линий (рис. 4.2 б). Наибольшие ширины линий сосредоточены в области распространения биполярного потока. Вокруг биполярного потока спектральные линии более узкие, а распределение ширин линий более однородно.

В разных точках молекулярного облака вне зоны биполярного потока центральная скорость линии ¹³CO и ее ширина меняются. Была призведена оценка масштаба этих изменений в предположении о случайности их характера. Среднеквадратичное отклонение центральной скорости и ширины линии, определенной из аппроксимации Гауссом, равно 0.2 км/с и 0.23 км/с соответственно. Из рис. 4.1 видно, что смещение центральной скорости, вызванное биполярным потоком составляет около 1 км/с, что значительно больше этих значений. Следовательно, в данном объекте в линии ¹³CO (J=1-0) биполярный поток проявляет себя как смещение спектра линии.

4.1.3. Параметры биполярного потока в области звездообразования IRAS 05345+3157

Для физических параметров низкоскоростной расчета части биполярного потока в области IRAS 05345+3157 применен метод МНСБП. При расчетах параметров биполярного потока температура возбуждения Тех вычислялась из яркостной температуры в центре профиля линии молекулы ¹²СО [4]. Для данного облака *T_{ex}* принималось 33 К. Отношение концентраций молекул H₂ и ¹³CO полагалось 5×10⁵ [83]. При расчетах не делалась коррекция на угол наклона между осью потока и лучом зрения. В таблице 4.1 приведены основные параметры биполярного потока, полученные в данной работе по наблюдениям молекулы ¹³СО методом МНСБП и аналогичные параметры, полученные другими авторами по наблюдениям молекулы ¹²CO. Во всех случаях рассчитывался нижний предел параметров биполярного потока. Символами Δv_r , Δv_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 красносмещенной области (рис. 4.3). Полагалось, что эта часть облака не имеет отношения к исследуемому биполярному потоку.

Таблица 4.1.

ооласти звездоооразования ІКАБ 05345+3157				
Молекула	¹³ CO	^{12}CO	¹² CO	
Переход	J=1-0	J=1-0	J=2-1	
$\Delta v_{\rm r}$, км/с	-17.416.5	-155		
$\Delta v_{\rm b}$, км/с	-2119.5	-3022		
Масса биполярного	370	7.6	6.1	
потока, M_{\odot}				
Импульс	550	37.1	38.3	
биполярного потока,				
<i>М</i> _⊙ ∙км/с				
Энергия	8.4	2	3.7	
биполярного потока,				
$10^{45} {\rm erg}$				
Ссылка	Данная работа	[107]	[4]	

Параметры биполярного по	тока в
бласти звездообразования IRAS	05345+3157

Карта распределения рассчитанной методом МНСБП интегральной интенсивности красносмещенного и синесмещенного компонент биполярного потока показаны штриховым пунктиром и сплошной линиями, соответственно на рис. 4.3 Фоновым цветом на рис. 4.3 показано распределение рассчитанной интегральной интенсивности стационарного облака.

Биполярный поток в линии молекулы ¹³СО (J=1-0) имеет протяженную форму, вытянутую в направлении с юго-востока на северо-запад. Красносмещенная часть потока расположена в юго-восточной части молекулярного облака, синесмещенная - в северо-западной. Сравнение карт биполярного потока с картой распределения массы стационарного облака биполярного показывает, ЧТО красносмещенная часть потока распространяется в плотных слоях молекулярного облака, в то время как существенная часть синесмещенной части часть биполярного потока распространяется в гораздо менее плотных слоях молекулярного облака.



Рис. 4.3. Карта распределения красносмещенного (штрих-пунктир) и синесмещенного (сплошная линия) компонентов биполярного потока в области IRAS 05345+3157 в линии J=1-0 молекулы ¹³CO. Крестиками показаны позиции, на которых проводились наблюдения. Тонкими линиями проведены контуры по уровням начиная с 1 К×км/с с шагом 0.5 К×км/с. Толстыми линиями показаны контуры на уровне 0,5 от максимальных значений. Фоновым серым цветом показано распределение рассчитанной интегральной интенсивности стационарного облака.

В работах [107] (рис. 8) и [4] (рис. 1) найдено, что биполярный поток в линиях J=1-0 и J=2-1 молекулы ¹²CO имеет протяженную форму, вытянутую в направлении запад-восток. Сравнение этих данных с нашими показывает, что положения красносмещенных компонент высокоскоростной (данные линий молекулы ¹²CO) и низкоскоростной (данные линии молекулы ¹³CO) части биполярного потока практически совпадают. Значительная доля синесмещенных компонент высокоскоростной части биполярного потока оказываются пространственно разнесены. Наблюдения на радиоинтерферометре SMA [108] небольшой области (70"×70") вблизи точки образования биполярного потока подтверждают это вывод.

На рис. 4.4. 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, соответствующих биполярному потоку. Диаграмма на рис. 4.4. имеет вид, характерный для биполярных потоков. Основным отличием данной диаграммы от аналогичных, построенных по обычной методике ПО наблюдаемым профилям линий молекулы ¹²СО, является отсутствие излучения на скоростях вблизи центральной скорости стационарного облака v_0^s , которое определяется микротурбулентным движением. Это является следствием применения метода МНСБП. Поскольку часть лучевой скорости v_0^s излучения вблизи относится К излучению стационарного облака, то метод МНСБП исключает ее из рассмотрения. Исключение микротурбулентного движения позволило четче выделить биполярность потока.



Рис. 4.4. 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.

Сравнение параметров биполярного потока в линиях молекул 12 CO и 13 CO показывает, что масса низкоскоростной части биполярного потока, определенная по линии молекулы 13 CO (J=1-0), намного больше массы, определенной по наблюдениям линий молекулы 12 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 вляется определяющим при оценке его параметров. Этот результат отражен в таблице 4.1.

4.2. Биполярное движение молекулярного вещества в области звездообразования IRAS 22267+6244

В данном подразделе исследуется низкоскоростная часть биполярного потока в области звездообразования IRAS 22267+6244 в линии молекулы ¹³СО (J=1-0). Этот источник ассоциируется с НІІ областью. Первые признаки наличия в нем биполярного потока описываются в работе [109], где было замечено наличие красного крыла в линии молекулы ¹²СО. В этой области неоднократно проводились поиски мазеров в молекулах H₂O [110], OH [111], NH₃OH [112]. Плотное ядро облака было откартографировано в линиях молекулы NH₃ [113]. В работе [114] получено изображение этого источника в К-диапазоне (2.2)мкм) И обнаружена отражательная туманность. Исследование биполярного потока В области звездообразования IRAS 22267+6244 в линии J=2-1 молекулы ¹²СО приводится в работе [5].

4.2.1. Наблюдения

Наблюдения области IRAS 22267+6244 в линии J=1-0 молекулы ¹³CO (110 ГГц) были проведены в октябре 2006 и октябре 2008 года на радиотелескопе РТ-22 КрАО. Картографировалась область размерами 6'×12'. При измерениях использовался высокочувствительный криогенный приемник, где в качестве входного элемента служил смеситель на диоде с

барьером Шоттки. Двухполосная шумовая температура приемника не превышала 100 К. Однополосная шумовая температура системы составляла 500-600 К в зависимости от погодных условий и угла места источника. Для спектрального анализа принимаемого излучения использовался Фурьеспектроанализатор с полосой обзора 14 МГц и спектральным разрешением 112 кГц (0.3 км/с). Наблюдения проводились в режиме "наведение-отвод". Коэффициент использования диаграммы направленности антенны составлял 0.15. Калибровка проводилась стандартным методом по черному телу [97].

4.2.2. Расчет параметров биполярного потока

Расчет параметров биполярного потока проводился с помощью метода определения низкоскоростных параметров биполярного потока МНСБП, как и для объекта IRAS 05345+3157. Температура возбуждения газа ¹³CO предполагалась равной 30 К [5]. Отношение концентраций молекул H_2 к ¹³CO полагалось 5×10⁵ [83]. Результаты расчетов приведены в таблице 4.2. Диапазоны скоростей, в которых проводился расчет параметров биполярного потока, указаны в таблице 4.2. Расчет масс стационарного облака и молекулярного облака проводился во всем диапазоне лучевых скоростей, в котором наблюдалось излучение молекулы ¹³CO (от -5,5 до 2 км/с).

Применяя метод МНСБП к данному потоку, было учтено следующее обстоятельство. Поток в этом облаке обладает столь сильной биполярностью, что предположение, сделанное в методе МНСБП о том, что в диапазоне скоростей, приближенному к центральной скорости, влияние биполярного потока предполагается незначительным, оказывается неверным. Поэтому для расчета параметров данного биполярного потока верхним пределом скорости синесмещенного компонента потока и нижним пределом скорости красносмещенного компонента потока считалась центральная скорость стационарного облака.

Таблица 4.2.

Параметры биполярного потока и молекулярного облака в области звездообразования IRAS 22267+6244. Данные по потоку в линии ¹²CO взяты из статьи [5]

ИЗ СТАТБИ [J]		
Молекула	¹³ CO	¹² CO
	(Низкоскоростной	(Высокоскоростной
	компонент)	компонент)
Масса молекулярного облака, M_{\odot}	780	
Масса стационарного облака, M_{\odot}	190	
Диапазоны скоростей, в которых проводился расчет параметров синесмещенного компонента, биполярного потока, км/с	-5,51,96	-19.95.6
Диапазоны скоростей, в которых проводился расчет параметров красносмещенного компонента биполярного потока, км/с	-1,96 2	1 19.8
Масса синесмещенного компонента биполярного потока, M_{\odot}	340	
Масса красносмещенного компонента биполярного потока, M_{\odot}	250	
Масса биполярного потока, M_{\odot}	590	3,8
Импульс биполярного потока, M_{\odot} · км/с	620	66
Энергия биполярного потока, 1045	9.8	12
Эрг		
Турбулентная кинетическая энергия молекулярного облака, 10 ⁴⁵ эрг	17	
Энергия связи молекулярного облака, 10 ⁴⁵ эрг	54	

4.2.3. Обсуждение результатов

На рис. 4.5 показана карта распределения интегральных интенсивностей красносмещенного (штрих-пунктирная линия) и синесмещенного (сплошная линия) компонентов биполярного потока в области IRAS 22267+6244 в линии J=1-0 молекулы ¹³CO, полученные интегрированием профиля наблюдаемых линий (рис. 4.5а) и с помощью

метода МНСБП (рис. 4.5б). Точками показаны позиции, на которых проводились наблюдения. Тонкими линиями проведены контуры по уровням начиная с 2 К км/с с шагом 2 К км/с. Толстыми линиями показаны контуры на уровне 0,5 от максимальных значений. Фоновым серым цветом показано распределение рассчитанной интегральной интенсивности молекулярного облака (рис. 4.5а) и стационарного облака (рис. 4.5б). Координаты максимума интегральной интенсивности молекулярного облака, изображенной фоновым цветом на рис. 4.5а находятся в центре биполярного потока и эта точка в дальнейшем считается центром облака. (Все карты этого приведенные в данной работе, центрированы относительно объекта. координат $RA(2000) = 22^{h} 28^{m} 30^{s}.0$ и $DEC(2000) = 62^{\circ} 59' 00'').$



Рис 4.5. Карта распределения интегральных интенсивностей красносмещенного (штрих-пунктирная линия) и синесмещенного (сплошная линия) компонентов биполярного потока в области IRAS 22267+6244 в линии J=1-0 молекулы ¹³CO, полученные интегрированием профиля наблюдаемых линий (рис. а) и с помощью метода МНСБП (рис. б). Толстыми линиями показаны контуры на уровне 0,5 от максимальных значений. Фоновым серым распределение рассчитанной цветом показано интегральной интенсивности молекулярного облака (рис. а) и стационарного облака (рис. б).

Из рисунка 4.5 видно, что облако обладает ярко выраженной Красносмещенный биполярностью. И синесмещенный компоненты полностью разделены на уровне 1/2 от максимальных значений. Это свидетельствует о том, что угол наклона оси потока к лучу зрения велик. Важной особенностью исследуемого облака является то, что основная его часть участвует в биполярном движении вещества, а масса стационарного облака мала по сравнению с массой биполярного потока (табл. 4.2). Она составляет всего лишь 24% от массы облака. Из рис 4.56 видно, что стационарное небольшую общего облако занимает часть объема молекулярного облака, а остальная часть принимает участие в движении, вызванным биполярным потоком. В то же время распределение интегральной интенсивности молекулярного облака на рис. 4.5а показывает, что основная масса молекулярного облака сосредоточена в центре и биполярный поток не приводит к сильному пространственному перемещению вещества.

Биполярный поток в линии молекулы ¹²СО обычно регистрируется в крыльях линии. Биполярный поток в линии молекулы ¹³СО проявляется в виде сдвига профиля линии вдоль направления оси потока. На рис. 4.6 приведены усредненные профили линий красносмещенного И синесмещенного компонентов биполярного потока. Усреднение проводилось по точкам, лежащим в пределах контура на уровне 0,5 от максимальных значений на рис. 4.5а. Хорошо видно, биполярный поток в линии ¹³СО проявляется как смещение по скорости всего профиля линии без существенного изменения его формы. Профили смещены относительно друг друга примерно на величину их ширины на уровне 1/2 от максимального значения.

Диаграмма позиция-скорость, построенная вдоль оси биполярного потока в области звездообразования IRAS 22267+6244, рассчитанная по профилям наблюдаемых линий, показана на рис. 4.7а. Диаграмма отражает



Рис. 4.6. Усредненные спектры красносмещенного (штрихованный пунктир) и синесмещенного (сплошная линия) компонентов биполярного потока в области IRAS 22267+6244.

высокую степень симметрии, присущую скоростной структуре данного биполярного потока. Следует также отметить систематическое увеличение скорости биполярного потока с расстоянием от центрального источника. Это свойство присуще многим биполярным потокам. Из рис. 4.7а видно, что на расстояниях, скорость биполярного удаленных OT центра, потока приближается к постоянной величине. Но эта диаграмма отражает распределение интенсивности всего молекулярного облака, в котором, кроме биполярного потока, содержится и излучение стационарного облака. На рис. 4.76 построена аналогичная диаграмма позиция-скорость, рассчитанная методом МНСБП и соответствующая излучению только биполярного потока. Точками отмечены позиции центральных скоростей, определенных с помощью аппроксимации профилей линий функцией Гаусса. Из рис. 4.76 что скорость биполярного потока линейно увеличивается видно, С расстоянием от центрального источника. Наиболее необычной особенностью этих диаграмм можно считать факт почти полного отсутствия излучения на скоростях, соответствующих скорости центра облака, в точках, удаленных от центра облака. Это свидетельствует о том, что почти все вещество,

находящееся вблизи оси потока на краях облака, сметено и движется вместе с биполярным потоком.



Рис. 4.7. Диаграмма позиция-скорость для области звездообразования IRAS 22267+6244 построенная в направлении оси биполярного потока, рассчитанная по профилям наблюдаемых линий (рис. а) и с помощью метода МНСБП (рис. б). Точками отмечены позиции центральных скоростей, определенных с помощью аппроксимации профилей линий функцией Гаусса.

Сравнение высокоскоростной части биполярного потока, определенной из наблюдений линии ¹²CO, с нашими данными показало, что положения красносмещенных компонентов высокоскоростной (данные линий молекулы ¹²CO [5]) и низкоскоростной (данные линии молекулы ¹³СО) части биполярного потока практически совпадают. Значительная часть синесмещенного компонента низкоскоростной части биполярного потока лежит юго-восточнее высокоскоростной части. Сравнение параметров биполярного потока в линиях молекул ¹²CO и ¹³CO показывает, что масса низкоскоростной части биполярного потока, определенная по линии ^{13}CO молекулы (J=1-0),намного больше массы, определенной ПО наблюдениям линий молекулы ¹²СО. А их энергии почти равны (табл. 1).

Сильные биполярные потоки оказывают мощное воздействие на родительское молекулярное облако. В данном случае, как указано выше, в движении, вызванном биполярным потоком, участвует значительная часть молекулярного облака. С целью найти численные оценки этого влияния, была рассчитана кинетическая энергия турбулентного движения и энергия связи молекулярного облака. Расчет производился по методике, изложенной В статье [33]. При этом предполагалось, что молекулярное облако представляет собой шар радиуса 4', в котором вещество равномерно распределено по всему объему. Масса молекулярного облака рассчитывалась по излучению молекулы ¹³СО и составила 780 M_{\odot} . Ширина линии на уровне половинной мощности рассчитывалась путем усреднения всех профилей линий по всем наблюдаемым позициям и аппроксимации полученного усредненного профиля линии функцией Гаусса. Ее величина составила 2.9 км/с. Результаты расчетов приведены в табл. 4.2. Из таблицы видно, что высокоскоростной суммарная энергия И низкоскоростной частей биполярного потока (21.8·10⁴⁵ эрг) превышает турбулентную кинетическую энергию молекулярного облака. В то же время, энергия биполярного потока меньше, чем энергия связи молекулярного облака. Но, учитывая, что нам известен только нижний предел энергии биполярного потока, и делая коррекцию на угол между направлением оси потока и лучом зрения, можно утверждать, что при угле 40°, энергия биполярного потока достигнет значения энергии связи молекулярного облака. Учитывая морфологию биполярного потока, такая возможность представляется вполне вероятной.

Простого сравнения энергий недостаточно для того, чтобы предсказать будущее молекулярного облака. Но можно утверждать, что биполярный поток поставляет в молекулярное облако энергию, сравнимую с турбулентной энергией и энергией связи облака и может способствовать поддержанию турбулентного движения в облаке и явиться причиной его гравитационной неустойчивости в будущем.
4.3. Биполярные потоки в области массивного звездообразования G122.0-7.1 в линиях молекул ¹²CO(J=1-0) и ¹³CO (J=1-0)

Область звездообразования G122.0-7.1, расположенная в окрестности инфракрасного источника IRAS 0042+5530, многократно исследовалась различными методами. Для двух звезд были проведены UBV фотометрические наблюдения и определено, что ОНИ относятся К спектральному классу В5 главной последовательности [115]. Также в этой зарегистрирован Н₂О мазер [116]. области был Этот объект был ассоциирован с HII областью и определен как молодой звездный объект, обладающий "низким" показателем цвета [117]. Наблюдения в линиях молекул CS(3-2), ¹³CO (2-1) C¹⁸O (2-1) C³⁴S (3-2) и HCO⁺, проведенные на 30 м радиотелескопе IRAM, привели к обнаружению малоразмерного плотной области (размер ~ 30"), содержащим молодой звездный объект [118]. Спектр излучения ¹³CO (2-1) имеет два пика, что было интерпретировано авторами как наличие двух отдельных фрагментов, движущихся с различными скоростями и размерами менее 10 угловых минут. Максимумы излучения исследованных молекулярных линий сосредотачиваются на площади, размером не более 20". Масса ядра, оцененная по наблюдениям молекулы ¹³СО, составляет не менее 2100 Мо. Были также проведены континуальные наблюдения в диапазонах длин волн 3,6 см и 3,4 мм, [105], 850 мкм [119]. Найденные величины потоков свидетельствуют о том, что должна содержать молодую звезду с светимостью ~3000 *L*⊙ спектрального класса В2.

Все эти исследования были проведены только в небольшой части молекулярного облака, связанного с IRAS 0042+5530. Карты, снятые IRAS показывают, что изображение источника IRAS 0042+5530 имеет овальную форму, вытянутую с юго-востока на северо-запад. Было предположено, что причиной такой формы является наличие в этом объекте двух отдельных плотных ядер. Это явилось основанием спектральных исследований этого объекта в общирной области, включающей оба ядра. В данной работе

представлены результаты картографирования массивной области звездообразования G122.0-7.1 в линиях молекул ¹²CO (1-0) и ¹³CO (1-0) на площади 15'×9'. При увеличении области исследований в этом молекулярном облаке было обнаружено наличие двух плотных областей звездообразования, названных ASO1 и ASO2.

4.3.1. Наблюдения

Наблюдения в линиях молекул ¹²CO (1-0) и ¹³CO (1-0) были начаты на 14 м телескопе Metsahovi (Финляндия). Ширина диаграммы направленности антенны на частоте 115 ГГц составляла 60 угловых секунд. При наблюдениях использовался криогенный приемник, где в качестве входного элемента использовался смеситель на диоде с барьером Шоттки, имеющим шумовую температуру ~ 100 K (DSB). В качестве регистрирующего устройства использовался 1600-ти канальный акусто-оптический спектроанализатор со спектральным разрешением 50 кГц (0.13 km/s при наблюдении линии ¹²CO (J=1-0)). При наблюдениях на телескопом Metsachovi использовались режимы диаграммной модуляции и частотной модуляции.

Наблюдения в линии молекулы ¹²СО (J=1-0) были продолжены, и картографирование источника G122.0-7.1 было закончено на телескопе PT-22 КрАО В октябре 2004 При наблюдениях года. использовался высокочувствительный приемник с диодом Шоттки на входе. Шумовая температура приемника в двухполосном режиме составляла ~ 70 К. При наблюдениях использовался цифровой Фурье-спектроанализатор, описанный в данной работе. Он имел частотное разрешение 32 кГц (0.08 km/s при наблюдении линии ¹²CO (J=1-0)). Калибровка проводилась по черному телу стандартным методом, описанным в работе [97]. Были получены спектры излучения молекулярного облака на 74 позициях в линии молекулы ¹²СО (J=1-0) и на 70 позициях в линии молекулы ¹³СО (J=1-0). Наблюдения велись на площади размерами 15'×9' с интервалом 1'.

4.3.2. Результаты картографирования области звездообразования G122.0-7.1 в линиях молекул ¹²СО и ¹³СО

Карты распределения интегральной интенсивности в лини J=1-0 молекул ¹²CO (штрих-пунктирная линия) и ¹³CO (сплошная линия) области звездообразования G122.0-7.1 представлены на рис. 4.8. Карты имеют размер $15' \times 9'$ и охватывают всю область звездообразования G122.0-7.1. На картах хорошо видны две отдельные плотные области, названные ASO1 и ASO2 (обозначены на рис. 4.8 знаками «I» и «II» соответственно). Эти карты совмещены с картой распределения континуального излучения на частоте 4850 МГц [120], показанной фоновым цветом. Максимумы этого излучения отмечены белым цветом. Символ Δ указывает позицию пикового излучения молекулы HCO⁺ (J=1-0) (Brand 2001). Все карты, приведенные в настоящей работе, центрированы относительно координат RA(1950) = 00^h 42^m 05^s.0 и DEC(1950) = 55° 31' 00").



Рис. 4.8. Карта распределения интегральных интенсивностей в линии J=1-0 молекул ¹²CO (штрих-пунктирная линия) и ¹³CO (сплошная линия) области звездообразования G122.0-7.1. Пределы интегрирования -55...-48 км/с (¹²CO) and -53,5...-49 км/с (¹³CO). Контуры проведены по уровням 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 К•км/с для ¹²CO и 4, 7, 10, 13, 16 К·км/с для ¹³CO. Фоновым серым цветом показано распределение континуального излучения на частоте 4850 МГц. Максимумы этого излучения отмечены белым цветом. Символ Δ указывает позицию пикового излучения молекулы HCO⁺ (J=1-0) (Brand 2001). В левом нижнем углу показан размер луча телескопа Metsahovi на уровне половинной мощности.

Спектры центральной части источника G122.0-7.1 показаны на рис. 4.9. Из рис. 4.9 видно, что спектры молекул 12 CO и 13 CO (J=1-0) вблизи источника ASO1 имеют не Гауссову форму. Многие спектры ассиметричны. Также следует отметить наличие красносмещенных и синесмещенных крыльев особенно в линии молекулы 12 CO. На некоторых спектрах 12 CO виден эффект самопоглощения. Профили линий 12 CO в области ASO2 симметричны и хорошо аппроксимируются функцией Гаусса. При этом их центральная скорость систематически сдвигается в зависимости от позиции, на которой проводились наблюдения.



Рис. 4.9. Спектры излучения линий ¹²СО (J=1-0) и ¹³СО (J=1-0) центральной части области звездообразования G122.0-7.1.

Между областями звездообразования ASO1 и ASO2 наблюдаемые профили линий хорошо описывается гауссианом. Они имеют меньшую ширину по сравнению со спектрами в ASO1 и ASO2. Это свидетельствует о том, что в данной области нет значительных турбулентных движений.

Спектры линий излучения молекулы 12 CO (J=1-0) имеют сложную структуру. Их форма сильно отличается от гауссовой. Также присутствуют широкие крылья с обеих сторон спектра. Биполярный поток, исследуемый традиционно по высокоскоростным компонентам спектра, расположен в направлении с юга на север с центром, совпадающим с позицией пикового излучения молекулы HCO⁺ (J=1-0) [118]. При этом, красносмещенная часть потока лежит в южной части источника ASO1, синесмещенная часть в северной. Максимум излучения линии ¹²CO также смещается в зависимости

от позиции наблюдения. Это смещение также происходит вдоль оси биполярного потока, но в противоположном направлении: красносмещенные максимумы характерны для спектров, лежащих в северной части источника ASO1, синесмещенные - в южной (рис. 4.10). Более полно этот же эффект проиллюстрирован на рис. 4.11.



Рис. 4.10. Спектры излучения линии молекулы СО (J=1-0) в двух точках источника ASO1. Спектр в северной части ASO1 обозначен тонкой линией, спектр в южной части ASO1 обозначен толстой линией.

4.3.3. Биполярный поток в источнике ASO1 в линии ¹²CO (J=1-0)

На рис. 4.11. показаны карты распределения интенсивностей излучения линии ¹²CO (J=1-0) области звездообразования G122.0-7.1 в различных диапазонах лучевых скоростей. Из рис. 4.11 видно, что с изменением диапазона скоростей от -54,5...-54 км/с до -49...-48,5 км/с максимум излучения смещается от точки с относительными координатами (0...-1) в точку с координатами (0...1), затем в точку с координатами (0...0) и затем в точку с координатами (0...2).

На рис. 4.12 показана диаграмма позиция-скорость для источника ASO1 построенная в направлении оси биполярного потока. Диаграмма построена для интенсивностей линий ¹²CO и ¹³CO. Из рис. 4.12 видно, что в излучении линии ¹³CO эффекта, подобного тому, что был описан выше для 12 CO не наблюдается, и в дальнейшем биполярный поток в линии ¹²CO исследовался только в высокоскоростном диапазоне частот.



Рис. 4.11. Карты распределения интенсивностей излучения линии ¹²CO (J=1-0) источника ASO1 в различных диапазонах лучевых скоростей. Значения диапазонов скоростей указаны в правом нижнем углу каждой карты. Контуры проведены по уровням начиная с 0.5 К×км/с с шагом 0.5 К×км/с.



Рис. 4.12. Диаграмма позиция-скорость для источника ASO1 построенная в направлении оси биполярного потока. Сплошными линиями контуры излучения линии 12 CO (J=1-0). Контуры проведены по уровням начиная с 1 К с шагом 1 К. Фоновым цветом показано распределение интенсивности излучения молекулы 13 CO (J=1-0).

Карта распределения интегральных интенсивностей красносмещенного (пунктирная линия) и синесмещенного (сплошная линия) компонентов биполярного потока в объекте ASO1 в линии J=1-0 молекулы ¹²CO показана на рис. 4.13. Тонкими линиями проведены контуры по уровням начиная с 0.5 с шагом 0.5 К км/с. Толстыми линиями показаны контуры на уровне 0,5 от максимальных значений. Синесмещенный и красносмещенный компоненты биполярного потока исследовались в высокоскоростном диапазоне скоростей: (-54 ... -53 км/с) и (-49.5 ... -48 км/с) соответственно.



Рис. 4.13. Карта распределения интегральных интенсивностей красносмещенного (пунктирная линия) и синесмещенного (сплошная линия) компонентов биполярных потоков в объекте ASO1 в линии J=1-0 молекулы¹²CO.

Для расчетов параметров биполярного потока был использован метод, предложенный в статье [30]. Этот метод, основанный на модели LTE, использует данные наблюдений линий молекул ¹²CO и ¹³CO позволяет рассчитать среднюю оптическую толщину, массу, импульс и энергию потока в выбранном диапазоне скоростей.

Температура возбуждения T_{ex} оценивалась по наблюдениям оптически толстой линии ¹²CO и полагалась равной 20 К. Отношение концентраций молекул H₂ и ¹²CO полагалось 10⁴ [30]. При расчетах не делалась коррекция

на угол наклона между осью потока и лучом зрения. В данной работе используется кинематическое расстояние до области звездообразования G122.1-7.1. Его величина составляет 7,7 кпк. Результаты расчетов представлены в таблице 4.3. Как видно из таблицы, общая масса биполярного потока составляет 940 M_{\odot} . Это гораздо больше, чем 47 M_{\odot} масса, определенная по наблюдениям линии ¹²CO (J=2-1), которая приведена в работе [4]. Такая разница в массах объясняется тем, что в данной работе учитывается оптическая толщина линии молекулы ¹²CO.

Таблица 4.3.

Параметры биполярного потока в источнике ASOI		
Диапазоны скоростей, в которых проводился расчет	-5453,	
параметров, биполярного потока, км/с	-49.548	
Macca, M_{\odot}	940	
Импульс, M_{\odot} · км/с	2230	
Энергия, 10 ⁴⁶ эрг	5,5	

4.3.4. Биполярный поток в источниках ASO1 и ASO2 в линии ¹³CO (J=1-0)

Характер излучения линий ¹²СО и ¹³СО в объектах ASO1 и ASO2 различен. В объекте ASO1 линии более широкие, чем в ASO2. Биполярный поток в объекте ASO1 проявляется в основном в крыльях линий ¹²СО. В ASO2 биполярный поток наблюдается в линии ¹³СО как смещение всего профиля линий.

На рис. 4.14. показаны карты распределения интенсивностей излучения линии ¹³CO (J=1-0) области звездообразования G122.0-7.1 в различных диапазонах лучевых скоростей. Символ ∆ указывает позицию пикового излучения молекулы HCO⁺ (J=1-0) [118] (характеризует позицию источника ASO1). Символ ▲ указывает позицию максимума континуального излучения на частоте 4850 МГц (характеризует позицию источника ASO2). Из рис. 4.14 видно, что с изменением диапазона скоростей от -53,1...-52,3 км/с до -49,9...-49,1 км/с максимум излучения смещается от точки с относительными

координатами (-1...2) в точку с координатами (0...-1). Спектр линии ¹³СО излучения на позиции (0, 0) не является Гауссовым. Эти эффекты в данной работе интерпретируются как следствие биполярного потока в источнике ASO1. Аналогичный эффект наблюдается и для источника ASO2.



Рис. 4.14. Карты распределения интенсивностей излучения ЛИНИИ ^{13}CO (J=1-0)области звездообразования G122.0-7.1 В различных диапазонах лучевых скоростей. Значения диапазонов скоростей указаны в правом нижнем каждой карты. Контуры углу проведены по уровням начиная с 0.5 К км/с с шагом 0.5 К км/с. Символ Δ указывает позицию пикового излучения молекулы HCO⁺ (J=1-0) (Brand 2001). Символ 🔺 указывает позицию максимума континуального излучения на частоте 4850 МГц. Крестиками на верхней карте которых указаны позиции, на проводились наблюдения.

Для расчета параметров низкоскоростной части биполярного потока в области звездообразования G122.0-7.1 в объектах ASO1 и ASO2. применялся

модернизированный МНСБП. При расчете не делалась коррекция на наклон оси биполярного потока к лучу зрения. Температура возбуждения газа ¹³CO определялась из наблюдений оптически толстой линии ¹²CO, и ее величина составляла 20 К. При расчете использовалось кинематическое расстояние до облака 7,7 кпс [118]. Кинетическая энергия и энергия связи молекулярного облака определялись по методике, изложенной в работе [33]. Результаты расчетов приведены в Таблице 4.4.

Таблица 4.4.

	ASO1	ASO2
Масса молекулярного облака, M_{\odot}	$1,1.10^4$	$8,9.10^{3}$
Масса стационарного облака, M_{\odot}	8,9·10 ³	$6,5\cdot10^{3}$
Диапазоны скоростей, в которых	-53 -51,4	-53 -51,4
проводился расчет параметров		
синесмещенного компонента,		
биполярного потока, км/с		
Диапазоны скоростей, в которых	-51,4 -49	-51,4 -49
проводился расчет параметров		
красносмещенного компонента		
биполярного потока, км/с		
Масса синесмещенного компонента	$1,3.10^{3}$	$1,3.10^{3}$
биполярного потока, M_{\odot}		
Масса красносмещенного компонента	$9,6\cdot10^2$	$1,1.10^{3}$
биполярного потока, M_{\odot}		
Масса биполярного потока, M_{\odot}	$2,2\cdot10^{3}$	$2,4\cdot10^{3}$
Импульс биполярного потока, M_{\odot}^{\times} км/с	$2 \cdot 10^3$	$1,6\cdot 10^3$
Энергия биполярного потока, 10 ⁴⁶ эрг	2,1	1,5
Турбулентная кинетическая энергия	7,2	5,7
молекулярного облака, 10 ⁴⁶ эрг		
Энергия связи молекулярного облака,	9,4	9
10*′ эрг		

Параметры биполярных потоков ASO1 и ASO2 в области звездообразования G122.0-7.1

Карта распределения интегральных интенсивностей красносмещенного (штрих-пунктирная линия) и синесмещенного (сплошная линия) компонентов биполярных потоков в объектах ASO1 и ASO2 в линии J=1-0

молекулы ¹³СО, полученные с помощью модернизированного МНСБП показана на рис. 4.15. Тонкими линиями проведены контуры по уровням начиная с 0 с шагом 2 К[·]км/с. Толстыми линиями показаны контуры на уровне 0,5 от максимальных значений. Фоновым серым цветом показано распределение рассчитанной интегральной интенсивности стационарного облака. Треугольником показан максимум континуального излучения на частоте 4850 МГц.



Рис. 4.15. Карта распределения интегральных интенсивностей красносмещенного (штрих-пунктирная линия) и синесмещенного (сплошная линия) компонентов биполярных потоков в объектах ASO1 и ASO2 в линии J=1-0 молекулы ¹³CO, полученные с модернизированного МНСБП. Тонкими линиями помощью проведены контуры по уровням начиная с 0 К км/сек с шагом 2 К×км/с. Толстыми линиями показаны контуры на уровне 0,5 от значений. максимальных Фоновым серым цветом показано интенсивности распределение рассчитанной интегральной стационарного облака. Треугольником показан максимум излучения континуального излучения на частоте 4850 МГц в объекте ASO2.

4.3.5. Обсуждение

Сравнение карт биполярного потока в линиях ¹²CO и ¹³CO в объекте ASO1 показывает, что положение красносмещенного компонента в этих линиях практически совпадает. Синесмещенный компонент, определенный по излучению линии ¹³CO, расположен северозападнее, чем синесмещенный компонент, определенный по излучению линии ¹²CO. Масса биполярного

потока, определенного по линиям J=1-0 молекул ¹²CO и ¹³CO составляет ~30% от массы всего молекулярного облака. При этом значительная часть массы (~10%) составляет высокоскоростную часть потока.

Суммарная энергия биполярного потока, определенная из наблюдений линий 12 CO и 13 CO составляет 7,6·10⁴⁶ эрг. Эта величина сравнима с турбулентной кинетической энергией молекулярного облака (Таблица 4.4). Энергия биполярного потока намного меньше энергии связи молекулярного облака (9,4·10⁴⁷ эрг). Соотношение этих энергий указывает на то, что этот биполярный поток не обладает потенциалом, способным рассеять молекулярное облако.

В объекте ASO2 в профилях линий ¹²CO отсутствуют крылья линий. Тем не менее, предполагается, что излучение в линии ¹³CO свидетельствует о наличии биполярного потока. Основным при этом является обнаруженный сдвиг линий излучения, величина которого увеличивается к его границе. Это наблюдается в биполярных потоках в ряде объектов при формировании массивных звезд (Например, в работе [35]). Кроме того, ASO2 находится в области звездообразования и находится вблизи с ядра, о чем свидетельствует также как и в случае с ASO1, максимум континуального излучения на частоте 4850 МГц. Его положение почти совпадает с максимумом интегральной интенсивности излучения молекулы ¹³CO.

Масса биполярного потока объекта ASO2, определенного по линиям J=1-0 молекул ¹³CO составляет ~27% от массы всего молекулярного облака. Энергия биполярного потока $(1,5\cdot10^{46} \text{ эрг})$ намного меньше турбулентной кинетической энергии $(5,7\cdot10^{46} \text{ эрг})$ и энергии связи молекулярного облака $(9\cdot10^{47} \text{ эрг})$. Следовательно, этот поток на данном этапе не может способствовать поддержанию турбулентного движения в облаке и явиться причиной его гравитационной нестабильности в будущем.

Выводы к разделу 4.

Проведено картографирование областей звездообразования большой массы IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 в линии молекулы ¹³CO (J=1-0) на частоте 110.2 ГГц. В области звездообразования G122.0-7.1 наблюдения проведены в линиях молекул ¹³CO (J=1-0) и ¹²CO (J=1-0). В этом объекте впервые была обнаружена вторая область звездообразования (ASO2), которая расположена вблизи известной ранее (ASO1). Во всех этих объектах биполярных установлено наличие потоков. Проведен анализ низкоскоростной части биполярных потоков и с помощью разработанного метода определены их основные параметры. Систематизировав все данные, общие выделены черты, присущие трем биполярным потокам IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 и G122.0-7.1 (ASO1):

- Во всех трех объектах влияние биполярного потока проявляется не только в изменении формы профиля линии, но и приводит к тому, что средняя скорость плотного ядра облака систематически сдвигается вдоль направления оси потока. Это является свидетельством того, что данное явление не единичное и характерно для многих областей звездообразования большой массы.
- Синесмещенные высокоскоростная и низкоскоростная компоненты всех трех потоков пространственно разнесены. Положение красносмещенных высокоскоростной и низкоскоростной компонент коррелируют между собой.
- Во всех трех биполярных потоках масса низкоскоростной компоненты биполярного потока значительно превышает массу высокоскоростной компоненты, а их кинетические энергии сравнимы.
- Центры образования биполярных потоков расположены вблизи максимумов излучения стационарной части облака.

Индивидуальные особенности биполярных потоков в изученных объектах:

Масса биполярного потока в объекте IRAS 22267+6244 составляет значительную часть от массы всего облака (76 %). Зависимость увеличения скорости биполярного потока с расстоянием от центрального источника носит линейный характер. Отмечено, что почти все вещество, находящееся вблизи оси потока на краях облака сметено и движется вместе с биполярным потоком. Кинетическая энергия этого потока превышает кинетическую энергия турбулентного движения облака и сравнима с энергией связи молекулярного облака.

В области звездообразования G122.0-7.1 характер излучения линий ¹²CO и ¹³CO в объектах ASO1 и ASO2 различен. В объекте ASO1 линии излучения молекул ¹²CO и ¹³CO более широкие, чем в ASO2. Биполярный поток в объекте ASO1 проявляется в основном в крыльях линий ¹²CO. В ASO2 биполярный поток наблюдается в линии ¹³CO как смещение всего профиля линий.

Масса биполярного потока ASO1 определялась по линиям J=1-0 молекул ¹²СО и ¹³СО и составляет ~30% от массы всего молекулярного (~10%) облака. При ЭТОМ значительная часть массы составляет высокоскоростную часть потока. Суммарная энергия биполярного потока, определенная из наблюдений линий ¹²CO и ¹³CO сравнима с турбулентной кинетической энергией молекулярного облака и значительно меньше энергии связи молекулярного облака. Соотношение этих энергий указывает на то, что этот биполярный поток не обладает потенциалом, способным рассеять молекулярное облако.

Масса биполярного потока объекта ASO2, определенного по линиям J=1-0 молекул ¹³CO составляет ~27% от массы всего молекулярного облака. Энергия биполярного потока намного меньше турбулентной кинетической энергии и энергии связи молекулярного облака.

выводы

Диссертационная работа посвящена исследованию биполярных потоков в молодых звездных объектах нашей Галактики. Биполярные потоки в молодых звездных объектах являются одним из важнейших признаков звездообразования и интенсивно исследуются методами современной радиоастрономии. Основные цели работы направлены на исследование малоизученной низкоскоростной части потоков, включая систематический сдвиг всего профиля линии вдоль направления движения вещества. Основные результаты диссертационной работы можно сформулировать следующим образом:

Проведено картографирование массивных областей звездообразования IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 в линии молекулы ¹³CO (J=1-0). Источник G122.0-7.1 картографировался в линиях молекул ¹²CO (J=1-0) и ¹³CO (J=1-0). Наблюдения впервые проводились на большой площади, захватывающей всю область потока. В источниках IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 впервые зарегистрированы биполярные потоки в линии ¹³CO (J=1-0). В источнике G122.0-7.1 кроме известного потока в области звездообразования (ASO1) обнаружен ранее не известный биполярный поток, ассоциируемый с новым кандидатом в молодые звездные объекты (ASO2).

Разработан новый метод расчета параметров низкоскоростной части биполярных потоков в молодых звездных объектах. В методе анализируется исходные спектры молекулярного облака и рассчитываются спектры стационарного облака и биполярного потока. МНСБП учитывает все проявления биполярного потока на спектрах молекулярного облака - асимметрию профилей линий, появление крыльев линий и систематический сдвиг всего профиля линии вдоль направления движения вещества. Метод позволяет определить массу стационарной части облака, а также массу, импульс и энергию синесмещенного и красносмещенноного биполярных компонентов. Метод применен для анализа линий молекулы ¹³СО (J=1-0),

хотя может быть легко адаптирован для анализа линий других молекул, например CS. Это дает возможность использовать его для исследования параметров ядер M3O. Проведен анализ влияния шумов на точность определения массы и энергии биполярного потока ASO1 в объекте G122.0-7.1. Показано, что при достигнутой в наблюдаемых спектрах величине среднеквадратичных отклонений сигнала из-за шумов (RMS) 0,26 K, ошибка в расчетах массы биполярного потока составляет ~15%, а энергии ~20%.

С помощью этого метода впервые найдены параметры и проведен анализ низкоскоростной части биполярных потоков в источниках IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244, G122.0-7.1. В результате анализа построены карты низкоскоростных частей потоков, определены их параметры, проведено сравнение низкоскоростных и высокоскоростных частей потоков, определены турбулентная кинетическая энергия и энергии связи молекулярных облаков.

В потоках в источниках IRAS 05345+3157, IRAS 22267+6244 и G122.0-7.1(ASO1) выявлены сходные свойства: Во всех этих источниках поток биполярный поток проявляется в линиях молекул ¹²CO и ¹³CO. Профили линии ¹³СО сдвигаются по частоте при изменении позиции наблюдения вдоль оси потока. Это позволяет сделать вывод, что сдвиг профиля линии распространенное явление в потоках, присущих массивным областям звездообразования. Синесмещенные высокоскоростная И низкоскоростная компоненты всех трех потоков пространственно разнесены. Положение красносмещенных высокоскоростной низкоскоростной И компонент коррелируют между собой. Масса низкоскоростной компоненты биполярного потока значительно превышает массу высокоскоростной компоненты, а их кинетические энергии сравнимы.

Показано, что скорость низкоскоростной части биполярного потока в источнике IRAS 22267+6244 линейно увеличивается с расстоянием от центрального источника.

Найдено, что отношение массы биполярных потоков к массе всего облака различно для разных объектов (30 % в источнике G122.0-7.1 и 76% в источнике IRAS 22267+6244).

Найлено. энергия биполярных потоков ЧТО В источниках IRAS 05345+3157 и G122.0-7.1 (ASO1) намного меньше энергии связи их родительских молекулярных облаков и, следовательно, эти потоки не могут дестабилизировать эти облака. В источнике IRAS 22267+6244 энергия биполярного потока больше турбулентной энергии и сравнима с энергией облака. Следовательно, связи молекулярного ЭТОТ поток может способствовать поддержанию турбулентного движения в облаке и явиться причиной его гравитационной неустойчивости в будущем.

Показано, что биполярные потоки в источниках G122.0-7.1 (ASO1) и G122.0-7.1 (ASO2) существенно отличаются по своим свойствам. В спектральные линии в источнике ASO1 более широкие, чем в ASO2. Биполярный поток в области ASO1 проявляется в основном в крыльях линий ¹²CO. В ASO2 биполярный поток наблюдается в линии ¹³CO как смещение всего профиля линий. Показано, что центры биполярных потоков в обоих источниках ASO1 и ASO2 совпадают с положением максимума интегральной интенсивности излучения молекулы ¹³CO, и лежат вблизи максимума континуального излучения на частоте 4850 МГц. Масса биполярного потока объекта ASO2, определенного по линиям J=1-0 молекул ¹³CO составляет ~27% от массы всего молекулярного облака. Энергии и энергии связи молекулярного облака.

Радиотелескоп РТ-22 оснащен новым приемным комплексом, позволяющем проводить наблюдения в диапазоне частот 85-115 ГГц. Это масштабная работа, выполняемая большим коллективом. В рамках этой задачи соискателем были выполнены следующие работы:

Для наблюдений в миллиметровом диапазоне длин волн был создан фурье-спектроанализатор. Его особенностью и отличием от аналогов

качестве основного процессор обычного является использование в персонального компьютера. Спектроанализатор позволяет работать в нескольких режимах. При этом полосу анализа можно установить 8, 10 или 14 МГц. Количество каналов можно задать 512, 2048 или 8192. Спектроанализатор также позволяет задать вид окна, используемого при расчетах Фурье преобразования. В настоящее время можно использовать прямоугольное окно, окно Гаусса и окно Натолла, а также задать коэффициент перекрытия окон. Динамический диапазон составляет не менее 40 дБ для спектроанализатора с полосой анализа 8 МГц и 20 дБ для спектроанализатора с полососами анализа 10 и 14 МГц. Эти характеристики вполне удовлетворительны для проведения радиоастрономических наблюдений в миллиметровом диапазоне длин волн.

Разработана система управления и сбора данных, которая осуществляет общее управление всем процессом проведения наблюдений, хранения и обработки полученных результатов. СУСД позволяет проводить наблюдения "ON-OFF", "наведение-отвод", частотной режимах модуляции В И осуществлять сканирование источника. СУСД позволяет сохранять результаты наблюдений на жестком диске во внутреннем формате, а также экспортировать полученные результаты в виде текстовых файлов либо файлах данных типа FITS. Кроме основных режимов, СУСД имеет набор тестов для проверки аппаратуры, позволяет осуществлять аппроксимацию экспериментальных данных Гауссовой кривой и полиномом, вычитать базовую линию, а также суммировать и усреднять результаты нескольких наблюдений.

Определены параметры антенны на частоте 87,7 ГГц. Показано, что качество поверхности главного зеркала телескопа РТ-22 в период с 1979 по 2007 год практически не изменилось. Впервые определены параметры антенны на частоте 110,2 ГГц. Показано, что в диапазоне углов высоты от 45° до 60° на этой частоте коэффициент использования диаграммы направленности равен 0.15.

В результате объемных по времени и трудовым затратам научнотехнических работ, радиотелескоп РТ-22 был оснащен современным высокочувствительным приемным комплексом и на нем были начаты регулярные спектральные наблюдения в коротковолновой части миллиметрового диапазона в широком интервале частот от 85 ГГц до 115 ГГц.

глубокую благодарность Автор диссертации выражает своему научному руководителю и соавтору большинства работ академику НАН Украины, профессору В. М. Шульге. Автор также выражает благодарность за сотрудничество миллиметровой плодотворное коллективам отдела Крымской радиоастрономии Радиоастрономического института И астрофизической обсерватории.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- RNO 43: a jet-driven super-outflow / Bence S., Richer J., Padman R. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1996. – Vol. 279, № 3. – P. 866-883.
- Arce H. Impact of giant stellar outflows on their clouds / Arce H. // Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias). Mexico. – 2003. – Vol. 15. – P. 123–125.
- 3. Bontemps S. Evolution of outflow activity around low-mass embedded young stellar objects / Bontemps S., Andre P., Terebey S., Cabrit S. // Astronomy and Astrophysics. 1996. Vol. 311. P. 858-872.
- Zhang Q. Search for CO Outflows toward a Sample of 69 High-Mass Protostellar Candidates. II. Outflow Properties / Zhang Q., Hunter T., Brand J. et al. // Astrophysical Journal. – 2005. – Vol. 625, № 2. – P. 864-882.
- Kim K. Occurrence Frequency of CO Outflows in Massive Protostellar Candidates / Kim K., Kurtz, S. // Astrophysical Journal. – 2006. – Vol. 643, № 2. – P. 978-984.
- Beuther H. Massive molecular outflows / Beuther H., Schilke P., Sridharan T., Menten K, Walmsley C., Wyrowski, F. // Astronomy and Astrophysics. 2002. Vol. 383. P. 892-904.
- Arce H. The Evolution of Outflow-Envelope Interactions in Low-Mass Protostars / Arce H., Sargent A. // Astrophysical Journal. – 2006. – Vol. 646, № 2. – P. 1070-1085.
- Bachiller R. Bipolar Molecular Outflows from Young Stars and Protostars / Bachiller R. // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. – 1996. – Vol. 34. – P. 111-154.
- Feigelson E. High-Energy Processes in Young Stellar Objects / Feigelson E., Montmerle T. // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. – 1999. – Vol. 37. – P. 363-408.
- 10.Canto J. Mixing layers in stellar outflows / Canto J., Raga A. // Astrophysical Journal. 1991. Vol. 372. P. 646-658.
- 11.Chernin L. Momentum Distribution in Molecular Outflows / Chernin L., Masson C. // Astrophysical Journal. 1995. Vol. 455. P.182-189.
- 12.Cliffe J. Precessing jets and molecular outflows: a 3D numerical study / Cliffe J., Frank A., Jones T. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1996. Vol. 282, № 4. P. 1114-1128.
- 13.Hatchell J. Temperature predictions for protostellar outflows / Hatchell J., Fuller G., Ladd E. // Astronomy and Astrophysics. – 1999. – Vol. 344. – P. 687-695.
- 14.Lee C. Hydrodynamic Simulations of Jet- and Wind-driven Protostellar Outflows / Lee C., Stone J., Ostriker E., Mundy L. // The Astrophysical Journal. – 2001. – Vol. 557, № 1. – P. 429-442.
- 15.Li Z. Magnetized Singular Isothermal Toroids / Li Z., Shu F. // Astrophysical Journal. 1996. Vol. 472. №1. P. 211-224.

- 16.Fiege J. A global model of protostellar bipolar outflow / Fiege J., Henriksen R. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1996. Vol. 281, № 3. P. 1055-1072.
- 17.Lery T. Magnetised protostellar bipolar outflows. I. Self-similar model with Poynting flux / Lery T., Henriksen R., Fiege J. // Astronomy and Astrophysics. 1999. Vol. 350. P. 254-274.
- 18.Wu Y. A study of high velocity molecular outflows with an up-to-date sample / Wu Y., Wei Y., Zhao M., Shi Y., Yu W., Qin S., Huang M. // Astronomy and Astrophysics. – 2004. – Vol. 426. – P. 503-515.
- 19.Girart J. On the Origin of the Molecular Outflows in IRAS 16293-2422 / Girart J., Estalella R., Palau A., Torrelles J., Rao R. // Astrophysical Journal. Letters. 2014. Vol. 780, № 1. P. L11.
- 20.Arce H. ALMA Observations of the HH 46/47 Molecular Outflow / Arce H., Mardones D., Corder S., Garay G., Noriega-Crespo A., Raga A. // Astrophysical Journal. – 2013. – Vol. 774, № 1. – P. 39-52.
- 21.Eislöffel J. SOFIA observations of CO (12-11) emission along the L1157 bipolar outflow / Eislöffel J., Nisini B., Güsten R., Wiesemeyer H., Gusdorf A. // Astronomy and Astrophysics. – 2012. – Vol. 542. – P. L11-L15.
- 22.Schwarz K. A Systematic Search for Molecular Outflows Toward Candidate Low-luminosity Protostars and Very Low Luminosity Objects / Schwarz K., Shirley Y., Dunham M. // Astronomical Journal. – 2012. – Vol. 144, № 4. – P. 115-135.
- 23.Wang K. The relation between ¹³CO J = 2-1 line width in molecular clouds and bolometric luminosity of associated IRAS sources / Wang K., Wu Y., Ran L., Yu W., Miller M. // Astronomy and Astrophysics. 2009. Vol. 507, № 1. P. 369-376.
- 24.Bally J. The high-velocity molecular flows near young stellar objects / Bally J., Lada C. // Astrophysical Journal. 1983. Vol. 265. P. 824-847.
- 25.Lada C. Cold outflows, energetic winds, and enigmatic jets around young stellar objects / Lada C. // Annual review of Astronomy and Astrophysics. – 1985. – Vol. 23. – P. 267-317.
- 26.Margulis M. Masses and energetics of high-velocity molecular outflows / Margulis M., Lada C. // Astrophysical Journal. – 1985. – Vol. 299. – P. 925-938.
- 27.Edwards S. A search for high-velocity molecular gas around T Tauri stars / Edwards S., Snell R. // Astrophysical Journal. – 1982. – Vol. 261. – P. 151-160.
- 28.Edwards S. A survey of high-velocity molecular gas near Herbig-Haro objects. II / Edwards S., Snell R. // Astrophysical Journal. – 1984. – Vol. 281. – P. 237-249.
- 29.Calvet N. Stellar winds and molecular clouds T Tauri stars / Calvet N., Canto J., Rodriguez L. // Astrophysical Journal. 1983. Vol. 268. P. 739-752.
- 30.Garden R. A spectroscopic study of the DR 21 outflow source. III The CO line emission / Garden R., Hayashi M., Hasegawa T., Gatley I., Kaifu N. // Astrophysical Journal. 1991. Vol. 374. P. 540-554.

- 31.Arce H. Outflow-Infall Interactions in Early Star Formation and Their Impact on the Mass-assembling Process in L1228 / Arce H., Sargent A. // Astrophysical Journal. 2004. Vol. 612, No. 1. P. 342-356.
- 32.Gomez J. On the nature of the bipolar molecular outflow in AFGL 437 / Gomez J., Torrelles J., Estalella R., Anglada G., Verdes-Montenegro L., Ho P.// Astrophysical Journal. 1992. Vol. 397. P. 492-499.
- 33.Arce H. The Episodic, Precessing Giant Molecular Outflow from IRAS 04239+2436 (HH 300) / Arce H., Goodman A. // Astrophysical Journal. – 2001. – Vol. 554, № 1. – P. 132-151.
- 34.Tafalla M. A Study of the Mutual Interaction between the Monoceros R2 Outflow and Its Surrounding Core / Tafalla M., Bachiller R., Wright M., Welch W. // Astrophysical Journal. – 1997. – Vol. 474, №1. – P. 329-345.
- 35.Tafalla M. Velocity Shifts in L1228: The Disruption of a Core by an Outflow / Tafalla M., Myers P. // Astrophysical Journal. 1997. Vol. 491, № 2. P. 653-662.
- 36. Antyufeyev A. Bipolar outflow in the vicinity of IRAS 05345+3157 in ¹³CO line / Antyufeyev A., Shulga V. // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. 2011. Vol. 27, № 6. Р. 282-290.
 Антюфеев А.В. Биполярный поток в области звездообразования IRAS 05345+3157 в линии молекулы ¹³CO / Антюфеев А.В., Шульга В.М. // Кинематика и физика небесных тел. 2011. Том. 27, № 6. с. 18-30.
- 37.Antyufeyev A. A spectroscopic study of the IRAS 05345+3157 bipolar outflow source / Antyufeyev A., Shulga V. // Proc. 2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. – Kharkov. Ukraine. – 21-26 June 2010.
- 38.Antyufeyev A. Bipolar molecular outflows in the star forming region IRAS 22267+6244 / Antyufeyev A., Shulga V. // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2012. Vol. 3, № 1. – P. 27-32.
- 39.Антюфеев А. В. Биполярный поток в области звездообразования IRAS 22267+6244 / Антюфеев А. В., Шульга В. М. // Proc. 12th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School. – Odessa. Ukraine. – 2012. – P. 33.
- 40.Antyufeyev A. Large-scale mapping of the IRAS 0042 + 5530 region in the ¹²CO (*J* = 1−0) and ¹³CO (*J* = 1−0) molecular lines / Antyufeyev A., Toriseva M., Shulga V. // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2008. – Vol. 24, № 5. – P. 229-235. Antyufeyev A. Large-scale mapping of the IRAS 0042+5530 region in the ¹²CO (J=1-0) and ¹³CO (J=1-0) molecular lines / Antyufeyev A., Toriseva M., Shulga V. // Кинематика и физика небесных тел – 2008. – Том. 24, № 5. – с. 333-344.
- 41.Antyufeyev A. Method for calculating low-velocity bipolar outflow parameters in massive star formation regions / Antyufeyev A., Shulga V. //

Kinematics and Physics of Celestial Bodies. -2014. - Vol. 30, No 3. - P. 137-146.

- 42.Антюфеев А.В. Использование интерфейса АТА для связи с внешним устройством / Антюфеев А.В. // Схемотехника. – 2004. – №1. – стр. 42-45.
- 43.Антюфеев А.В. Спектроанализатор на базе персонального компьютера для радиоастрономических исследований / Антюфеев А.В., Шульга В.М. // Радиотехника. 2005. № 10. стр. 145-148.
- 44.Антюфеев А.В. Фурье-спектроанализатор на базе персонального компьютера Athlon-1000 / Антюфеев А.В., Шульга В.М. // Тезисы докладов 2-й Харьковской конференций молодых ученых. Харьков. Украина. 2002. с. 5-6.
- 45.Вольвач А.Е. Спектроанализатор для изучения на РТ-22 КрАО мазерных источников / Вольвач А.Е., Стрепка И.Д., Никитин П.С., Вольвач Л.Н., Шульга В.М., Антюфеев А.В., Мышенко В.В. // Тезисы докладов 13-й Международной Крымской конференций "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Севастополь, Украина. 2003. с. 776-777.
- 46.Антюфеев А.В. Многоканальное 16-бит устройство сбора/передачи данных / Антюфеев А.В., Королев А.М., Поладич А.В. // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 4. с.163-165.
- 47.Антюфеев А.В. Аппаратурный комплекс для спектральных наблюдений в диапазоне частот 85-116 ГГц на радиотелескопе РТ-22 КрАО / Антюфеев А.В., Зубрин С.Ю., Король А.Н., Королев А.М., Мышенко В.В., Подьячий В.И., Поладич А.П., Шкодин В.И, Шульга В.М. // Радиофизика и радиоастрономия. 2010. т. 15, № 4. с. 369-375.
- 48.Peskovatskii S.A. A cryogenic 3 mm schottky diode mixer receiver. / Peskovatskii S.A., Shulga V.M., Piddiachii V.I., Koroliov A.M., Myshenko V.V., Antyufeyev A.V., Lavrik I.V. // Proc. The Fourth International Kharkov Symposium "Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves". Kharkov. Ukraine. 2001. P. 741-743.
- 49.Антюфеев А.В. Радиоспектрометр диапазона частот 85...115 ГГц для наблюдения мазерных линий на РТ-22 / Антюфеев А.В., Зубрин С.Ю., Королёв А.М., Мышенко В.В., Мышенко А.В., Шульга В.М. // Тезисы докладов 16 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, Украина. 2006. с. 944-945.
- 50.Антюфеев А.В. Исследование параметров антенны РТ-22 КрАО на длине волны 3,42 мм / Антюфеев А.В., Зубрин С. Ю., Мышенко В.В., Зинченко И.И., Вольвач А. Е., Шульга В. М // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. т.14, № 4. с. 345-352.
- 51.Антюфеев А.В. Спектральные наблюдения на радиотелескопе РТ-22 (КрАО) в 3-х мм диапазоне длин волн / Антюфеев А.В., Зубрин С. Ю., Мышенко В. В., Шульга В. М. // Тезисы докладов XXIV конференции

«Актуальные проблемы внегалактической астрономии». – Пущино, Россия. – 24-26 апреля 2007. – с. 1.

- 52.Лада Ч. Выбросы энергии из молодых звезд / Лада Ч. // Успехи физических наук 1983. Vol. 140, № 3. Р. 503-520.
- 53.Herbig G. The Spectra of Two Nebulous Objects Near NGC 1999 / Herbig G. // Astrophysical Journal – 1951. – Vol. 113. – p. 697-699.
- 54.Haro G. Herbig's Nebulous Objects Near NGC 1999 / Haro G. // Astrophysical Journal 1952. Vol. 115. P. 572-572.
- 55.Schwartz R. D. T Tauri Nebulae and Herbig-Haro Nebulae Evidence for excitation by a strong stellar wind / Schwartz R. D. // Astrophysical Journal - 1975. - Vol. 195. - P. 631-642.
- 56.Cudworth K. Two large-proper-motion Herbig-Haro objects / Cudworth K., Herbig G. // Astronomical Journal. – 1979. – Vol. 84, № 4. – P. 548-551.
- 57.Kwan J. The nature of the broad molecular line emission at the Kleinmann-Low nebula / Kwan J., Scoville N. // Astrophysical Journal Letters. 1976. Vol. 210. P. 39-43.
- 58.Snell R. Observations of CO in L1551 Evidence for stellar wind driven shocks / Snell R., Loren R., Plambeck R. // Astrophysical Journal Letters. – 1980. – Vol. 239. – P. 17-22.
- 59.Fukui Y. Molecular outflow / Fukui Y., Iwata T., Mizuno A., Bally J. at al. // In: Protostars and planets III. – 1993. – P. 603-639.
- 60.Сурдин В.Г. Рождение звезд // Издательство УРСС. 2000. с. 261.
- 61.Chernin L. Powerful jets and weak outflows: HH 1-2 and HH 34 / Chernin L., Masson C. // Astrophysical Journal. 1995. Vol. 443, № 1. P. 181-186.
- 62.Reipurth B. Herbig-Haro Jets at Optical, Infrared and Millimeter Wavelengths / Reipurth B., Cernicharo J. Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias). Mexico. 1995. Vol. 1. P. 43.
- 63.Lada C. The Structure and Energetics of a Highly Collimated Bipolar Outflow: NGC 2264G / Lada C., Fich M. // Astrophysical Journal. 1996. Vol. 459. P. 638-652.
- 64.Palau A., Submillimeter Emission from the Hot Molecular Jet HH 211 / Palau A., Ho P., Zhang Q. et al. // Astrophysical Journal. 2006. Vol. 636, № 2. P. L137-L140.
- 65.Ridge N. A single distance sample of molecular outflows from high-mass young stellar objects / Ridge N., Moore T. // Astronomy and Astrophysics. – 2001. – Vol. 378. – P. 495-508.
- 66.Richer J. Molecular Outflows from Young Stellar Objects / Richer J., Shepherd D., Cabrit S., Bachiller R., Churchwell E. // In: Protostars and planets IV. – 2000. – P. 867-894.
- 67.Snell R. High-velocity molecular jets / Snell R., Scoville N., Sanders D., Erickson N. // Astrophysical Journal. 1984. Vol. 284. P. 176-193.
- 68.Dunham M. Molecular Outflows Driven by Low-mass Protostars. I. Correcting for Underestimates When Measuring Outflow Masses and

Dynamical Properties / Dunham M., Arce H., Mardones D. et al. // Astrophysical Journal. – 2014. – Vol. 783, № 1. – P. 29D.

- 69.Arce H. Molecular Outflows in Low- and High-Mass Star-forming Regions / Arce H., Shepherd D., Gueth F., Lee C., Bachiller R., Rosen A., Beuther H. // In: Protostars and planets V. 2007. P. 245-260.
- 70.Lada C., Kylafis N. The Origin of Stars and Planetary Systems // Springer Science & Business Media. – 1999. – P. 718.
- 71.Gueth F. The jet-driven molecular outflow of HH 211 / Gueth F., Guilloteau S. // Astronomy and Astrophysics. 1999. Vol. 343. P. 571-584.
- 72.Bachiller R. Successive ejection events in the L1551 molecular outflow / Bachiller R., Tafalla M., Cernicharo J. // Astrophysical Journal Letters. – 1994. – Vol. 425. – P. 96-96.
- 73.Gueth F. A precessing jet in the L1157 molecular outflow / Gueth F., Guilloteau S., Bachiller R. // Astronomy and Astrophysics. – 1996. – Vol. 307. – P. 891-897.
- 74.Lee C. CO Outflows from Young Stellar Objects / Lee C., Mundy L., Stone J., Ostriker E. // Astrophysical Journal. – 2002. – Vol. 576, № 1. – P. 294-312.
- 75.Shu F. Star formation and the nature of bipolar outflows / Shu F., Ruden S., Lada C., Lizano S. // Astrophysical Journal. 1991. Vol. 370. P. 31-34.
- 76.Yamashita T. A new CO bipolar flow and dense disk system associated with the infrared reflection nebula GGD 27 IRS / Yamashita T., Suzuki H., Kaifu N. et al. // Astrophysical Journal. 1989. Vol. 347. P. 894-900.
- 77.Marti J. HH 80-81: A Highly Collimated Herbig-Haro Complex Powered by a Massive Young Star / Marti J., Rodriguez L., Reipurth B. // Astrophysical Journal. – 1993. – Vol. 416. – P. 208-217.
- 78.Shepherd D. The Molecular Outflow and Possible Precessing Jet from the Massive Young Stellar Object IRAS 20126+4104 / Shepherd D., Yu K., Bally J., Testi L. // Astrophysical Journal. 2000. Vol. 535, № 2. P. 833-846.
- 79.Sánchez-Monge Á. Evolution and excitation conditions of outflows in high-mass star-forming regions / Sánchez-Monge Á., López-Sepulcre A., Cesaroni R., et al. // Astronomy and Astrophysics. 2013. Vol. 557. P. 94-125.
- 80.Myers P. Dense cores in dark clouds. V CO outflow / Myers P., Heyer M., Snell R., Goldsmith P. // Astrophysical Journal. – 1988. – Vol. 324. – P. 907-919.
- 81.Dobashi K. Interaction between a massive molecular outflow and dense gas associated with IRAS 22142+5206 / Dobashi K., Yonekura Y., Hayashi Y., Sato F., Ogawa H. // Astronomical Journal. – 1998. – Vol. 115. – P. 777-786.
- 82. The history of mass dispersal around Herbig Ae/Be stars / Fuente A., Martin-Pintado J., Bachiller R., Rodriguez-Franco A., Palla F. // Astronomy and Astrophysics. 2002. Vol. 387. P. 977-992.

- 83.Dickman R. The ratio of carbon monoxide to molecular hydrogen in interstellar dark clouds / Dickman R. Astrophysical Journal Supplement Series. – 1978. – Vol. 37. – P. 407-427.
- 84.Cabrit S. CO line formation in bipolar flows. II Decelerated outflow case and summary of results / Cabrit S., Bertout C. // Astrophysical Journal 1990. Vol. 348. P. 530-541.
- 85.Yu K. Parsec-Scale CO Outflow and H2 Jets in Barnard 5 / Yu K., Billawala Y., Bally J. // Astronomical Journal. 1999. Vol. 118, № 6. P. 2940-2961.
- 86.Moriarty-Schieven G. The L1551NE molecular outflow / Moriarty-Schieven G., Butner H., Wannier P. // Astrophysical Journal. 1995. Vol. 445, № 1. P. 55-58.
- 87.Иванов В.Н. Новый радиотелескоп Крымской астрофизической обсерватории АН СССР с 22-метровым параболическим рефлектором / Иванов В.Н., Моисеев И.Г., Монин Ю.Г. // Изв. Крымской астрофизической обсерватории. 1967. Т. 38. С. 141-148.
- 88.Нестеров Н. Новая система управления РТ-22 / Нестеров Н., Никитин П.// Изв. Крымской астрофизической обсерватории. 2002. Т. 98. С. 150-156.
- 89.Ulich B. Absolute calibration of millimeter-wavelength spectral lines / Ulich B., Haas R. // Astrophysical Journal Suppl Series. – 1976. – Vol. 30. – P. 247-258.
- 90.Press W., Teukolsky S., Vetterling W., Flannery B. Numerical Recipes // Cambridge University Press. 2007. P. 1235.
- 91.Марпл-мл. С. Цифровой спектральный анализ и его приложения. // Москва МИР 1990. с. 584.
- 92.Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. // Москва МИР 1982. с. 428.
- 93.Kaplan G. Mean and apparent place computations in the new IAU system. III - Apparent, topocentric, and astrometric places of planets and stars / Kaplan G., Hughes J., Seidelmann P., Smith C., Yallop B. // Astronomical Journal. – 1989. – Vol. 97. – P. 1197-1210.
- 94.Cogdell J. High resolution millimeter reflector antennas / Cogdell J., McCue J., Kalachev P. et al. // IEEE Trans. Antennas and Propag. Vol. AP-18. P. 515 529.
- 95.Ефанов В. Наблюдения космических радиоисточников на длине волны 3,9 мм / Ефанов В., Зинченко И., Кисляков А., Кузнецов И., Моисеев И., Наумов А. // Изв. Крымской астрофизической обсерватории. – 1975. – Т. 53. – С. 144-149.
- 96. Есепкина Н. Исследование диаграмм направленности больших антенн с передатчиком в ближней зоне / Есепкина Н. // Доклады АН СССР. 1958. Т. 113, № 1. С. 17-22.
- 97.Kutner M. Recommendation for calibration of millimeter-wavelength spectral line data / Kutner M., Ulich B. // Astrophysical Journal. 1981. Vol. 250. P. 341-348.

- 98.Baars J. The measurement of large antennas with cosmic radio source. IEEE Trans. on antennas and propagation. / Baars J. // 1973. – Vol. AP-21, №4. – P. 461-474.
- 99.Ulich B. Absolute brightness temperature at 3.5-mm wavelength / Ulich B., Davis J., Rhodes J., Hollis J. // IEEE Trans. on antennas and propagation. – 1980. – Vol. AP-28, №3. – P. 367-377.
- 100. Ulich B. Millimeter wave continuum calibration sources / Ulich B. // Astronomical Journal. 1981. Vol. 86. P. 1619-1626.
- 101. Kramer C. Calibration of spectral line data at IRAM 30m radio telescope // IRAM report. 1997.
- 102. Martin H. CO emission from fragmentary molecular clouds A model applied to observations of M17 SW / Martin H.; Hills R.; Sanders D. // MNRAS. – 1984. – Vol. 208. – P. 35-55.
- 103. Torrelles J. The molecular core in the AFGL 5157 region / Torrelles J., Eiroa C., Mauersberger R. et al. // Astrophysical Journal. 1992. Vol. 384. P. 528-535.
- 104. Torrelles J. The powering sources of the molecular outflows in the AFGL 437, AFGL 5142, and AFGL 5157 regions / Torrelles J., Gomez J., Anglada G. et al. // Astrophysical Journal. 1992. Vol. 392. P. 616-621.
- 105. Molinari S. The Formation of Massive Stars. I. High-Resolution Millimeter and Radio Studies of High-Mass Protostellar Candidates / Molinari S., Testi L., Rodriguez L. et al. // Astrophysical Journal. – 2002. – Vol. 570. – P. 758-778.
- 106. Fontani F. Highly deuterated pre-stellar cores in a high-mass star formation region / Fontani F., Caselli P., Bourke T. et al. // Astronomy and Astrophysics. 2008. Vol. 477. P. 45-48.
- 107. Snell R. Molecular outflows associated with bright far-infrared sources / Snell R., Huang Y., Dickman R. et al. // Astrophysical Journal. – 1988. – Vol. 325. – P. 853-863.
- 108. Fontani F. Linking pre- and proto-stellar objects in the intermediate-/high-mass star forming region IRAS 05345+3157 / Fontani F., Zhang Q., Caselli P. et al // Astronomy and Astrophysics. – 2009. – Vol. 499. – P. 233-247.
- 109. Wouterloot J. IRAS sources beyond the solar circle. I CO observations / Wouterloot J., Brand J. // Astronomy and Astrophysics Supplement Series. 1989. Vol. 80, № 2. P. 149-187.
- Kazuyoshi S. Water Maser and Ammonia Survey toward IRAS Sources in the Galaxy I. H₂O Maser Data / Kazuyoshi S., Takeshi N., Norio I., Satoshi H., Yoshimi K., Ji Y. // Publ. Astron. Soc. Japan. – 2007. – Vol. 59. – P. 1185–1219.
- Edris K. A survey of OH masers towards high mass protostellar objects / Edris K., Fuller G., Cohen R. // Astronomy and Astrophysics. 2007. Vol. 465. P. 865-877.

- 112. Fontani F. Class I and Class II methanol masers in high-mass starforming regions / Fontani F., Cesaroni R., Furuya R. // Astronomy and Astrophysics. – 2010. – Vol. 517. – P. 56.
- 113. Jijina J. Dense cores mapped in ammonia: a Database / Jijina J., Myers P., Adams F. // Astrophysical Journal Supplement Series. – 1999. – Vol. 125. – P. 161-236.
- 114. Connelley M. Infrared nebulae around young stellar objects / Connelley M., Reipurth B., Tokunaga A. // Astronomical Journal. – 2007. – Vol. 133. – P. 1528 – 1559.
- 115. Neckel, T. A survey of bipolar and cometary nebulae Photographic and photometric observations / Neckel, T., Staude, H. // Astronomy and Astrophysics. 1984. Vol. 131, № 2. P. 200-209.
- 116. Palla F. Water masers associated with dense molecular clouds and ultracompact H II regions / Palla F., Brand J., Comoretto G., Felli M., Cesaroni R. // Astronomy and Astrophysics. – 1991. – Vol. 246, № 1. – P. 249-263.
- Molinari S. A search for precursors of Ultracompact Hii regions in a sample of luminous IRAS sources. III. Circumstellar dust properties / Molinari S., Brand J., Cesaroni R., Palla F. // Astronomy and Astrophysics. 2000. Vol. 355. P. 617-628.
- 118. Brand J. A molecular-line study of clumps with embedded high-mass protostar candidates / Brand J., Cesaroni R., Palla F., Molinari S. // Astronomy and Astrophysics. 2001. Vol. 370. P. 230-264.
- 119. Jenness T. R. Studies of Embedded Far Infrared Sources in the Vicinity of H₂O Masers I. Observations / Jenness T., Scott P., Padman R. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1995. Vol. 276, № 3. P. 1024-1040.
- 120. Condon J. A 4.85 GHz sky survey. 3: Epoch 1986 and combined (1986+1987) maps covering 0 deg less than delta less than +75 deg / Condon J., Broderick J., Seielstad G., Douglas K., Gregory P. // Astronomical Journal. 1994. Vol. 107, № 5. P. 1829-1833.