

УДК [524.3-52+524.42]:520.27+52-125

ВОЗМОЖНОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ НА ПЛОЩАДКЕ МРАО «СУФФА»: ОБЪЕКТЫ И ЗАДАЧИ

© 2025 А. С. Ходжаев^{1*}, И. И. Зинченко^{2**}¹Астрономический институт им. Улугбека АН РУз, Ташкент, 100052 Узбекистан²Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород, 603950 Россия

Поступила в редакцию 16 августа 2024 года; после доработки 4 ноября 2024 года; принята к публикации 8 декабря 2024 года

Описаны основные, остающиеся неясными вопросы процесса звездообразования, которые можно было бы изучать с помощью миллиметрового радиотелескопа на плато Суффа (Узбекистан). Приводится описание возможных объектов исследования. Оцениваются возможности решения научных задач по исследованию этих объектов с помощью различных инструментов: 70-м радиотелескопа РТ-70, антенны меньшего диаметра (15–20 м), антенной решетки, состоящей из небольших (3–8 м) антенн, перспективных молодых объектов и областей звездообразования для наблюдения с помощью строящегося на плато Суффа (Узбекистан) радиотелескопа миллиметрового диапазона РТ-70. Рассматриваются возможные задачи для их исследования с помощью РТ-70 и оцениваются необходимые для этого временные затраты. Дается краткое сравнение планируемых характеристик РТ-70 с параметрами других крупных радиотелескопов миллиметрового диапазона длин волн.

Ключевые слова: *звезды: формирование — ISM: облака — радиолинии: ISM — телескопы*

1. ВВЕДЕНИЕ

Миллиметровая и субмиллиметровая астрономия является важнейшим инструментом исследования различных астрономических объектов и явлений (например, Zinchenko, 2003; Wilson and Guilloteau, 2018; Stolyarov et al., 2024). В частности, наблюдения на миллиметровых и субмиллиметровых длинах волн — основной источник информации о физико-химических условиях и процессах в областях звездообразования (ЗО), помогающий понять механизмы образования звезд. Число радиотелескопов этого диапазона в мире весьма ограничено. Успех проекта «Телескоп горизонта событий» (ТГС) стимулирует планы по его развитию (Doeleman et al., 2023). Новые радиотелескопы должны размещаться в местах с подходящим для данного диапазона астроклиматом. Среди возможных мест размещения рассматривается и плато Суффа в Узбекистане (Raymond et al., 2021).

На плато Суффа еще в 1980-х годах началось строительство гигантского 70-м радиотелескопа, рабочий диапазон длин волн которого должен был достигать $\lambda \sim 1$ мм (Hojaev and Shanin, 1997; Hojaev et al., 2007; Artemenko et al., 2019). В 1990-х годах строительство было заморожено,

но существуют планы по его возобновлению. Рассматриваются также альтернативные планы строительства на этой площадке одной или нескольких антенн меньшего диаметра. При достижении запланированных технических характеристик (см., например, Artemenko et al., 2019) радиотелескоп РТ-70 на плато Суффа (далее РТ-70-Суффа) станет одним из крупнейших в мире радиоастрономических инструментов, работающих на коротких миллиметровых волнах. Среди приоритетных задач для РТ-70-Суффа будет изучение процессов звездообразования и молодых звездных и дозвездных объектов. Наряду с образованием звезд различных масс и процессом их эволюции, будут изучаться также околозвездные образования, протопланетные диски, возможные экзопланеты и условия их формирования. Рассмотрению другой приоритетной задачи — детальному исследованию структуры и кинематики молекулярных облаков (МО) и их астрохимии — была посвящена наша предыдущая работа (Hojaev and Zinchenko, 2021). С помощью РТ-70-Суффа мы можем больше узнать о морфологической структуре, кинематике, химическом составе (астрохимии) областей ЗО, физических условиях и магнитных полях в них. Это позволит лучше понять процесс ЗО, провести исследование излучения молодых звезд (или их околозвездных оболочек, аккреционных и протопланетных дисков)

*E-mail: hojaev@yahoo.com

**E-mail: zin@ipfran.ru

на миллиметровых волнах, глубокий поиск новых протозвездных и дозвездных ядер в звездообразующих МО, провести общий анализ звезд до главной последовательности (ГП) и молодых звездообразных объектов (а также плотных ядер и сгустков) на предмет их физических свойств и кинематики. В совокупности с данными наблюдений в других диапазонах с использованием разных баз данных (Gaia EDR3, 2MASS, Chandra, Spitzer, IPHAS¹ и других), можно определить основные физические параметры (такие как общая и локальная масса, включая плотные ядра и сгустки, плотность, температура, вращение, химический состав и т. д.) различных протозвездных и молодых звездных объектов, оценить вероятность ЗО внутри материнских МО и провести их физическое моделирование. В настоящей статье мы попытались очертить основной круг злободневных задач, все еще актуальных для понимания физики образования и ранней эволюции звезд, остающиеся неясными вопросы процесса ЗО, направления и методы их исследования. Были также рассмотрены и предложены в качестве объектов для наблюдения на РТ-70-Суффа ряд исследованных в той или иной мере областей или отдельных объектов ЗО, параметры и описание перспективных молодых объектов и областей ЗО как для проверки возможностей РТ-70-Суффа, астрофизической калибровки, так и для их всестороннего и более детального изучения, в дополнение к имеющемуся в настоящее время представлению о них. Произведено сравнение возможностей РТ-70-Суффа с другими аналогичными инструментами при решении поставленных задач. Проанализированы возможности решения этих задач с помощью отдельного радиотелескопа миллиметрового диапазона с меньшей апертурой, а также решетки таких радиотелескопов, установленных на плато Суффа и в ближайшей его окрестности.

2. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Известно, что проблемы образования звезд и планет являются одними из важнейших и труднейших задач, стоящих перед современными астрофизиками (например, Lada, 2005). Сжатие (коллапс) протозвездных сгустков вызывается гравитацией и внешним давлением; тепловое давление газа, вращение сгустков, турбулентность, радиационное давление и магнитное поле противостоят сжатию, так что общий сценарий образования звезды обусловлен сложным взаимодействием этих факторов. В деталях скорость ЗО зависит от температуры газа, скорости движения, гравитационного потенциала окружающей среды, напряженности магнитного

поля, ионизирующих фотонов от ближайших звезд и многого другого. Основой современной теории ЗО является учет взаимодействия всех этих процессов. Наблюдать же за процессами ЗО сложно, в частности, из-за того, что энергетика процесса перехода газа в звезды, особенно на начальных фазах, низка, в дополнение пылевая компонента области ЗО непрозрачна для видимого света. К счастью, их можно наблюдать с помощью радиотелескопов. Для исследования H_2 в Галактике (да и вне ее), а через него и процесса ЗО часто используют линию $CO(1-0)$. Рассматривают так называемый X-фактор, равный отношению концентрации H_2 по лучу зрения к интегральной интенсивности линии $CO(1-0)$. Однако надо иметь в виду, что в областях, где оптическая толщина в этой линии велика, при увеличении концентрации H_2 по лучу зрения X-фактор неточен, то есть при определении лучевой концентрации H_2 возможна неопределенность, превышающая порядок величины (Bell et al., 2006; Burgh et al., 2007). В холодной межзвездной среде (МЗС) молекулы CO вымораживаются на пылинках и, следовательно, не обнаруживаются в спектрах таких молекулярных областей. Так, исследования однократно ионизированного углерода (C^+) показали существование молекулярного газа, не обнаруженного в CO , в диффузных областях, где поток FUV фотодиссоциирует CO с образованием C^+ , хотя H_2 остается. Более того, содержание таких молекул, как CH , OH и NH , имеет сильную корреляцию с H_2 , а значения относительного содержания остаются постоянными в значительном диапазоне условий в МЗС. Следовательно, для изучения структуры и кинематики вещества в ближайших областях ЗО и молекулярных облаков эффективнее использовать наблюдения высоковозбужденных линий молекулы CO и линий ее изотопологов, дополненные наблюдениями линий сверхтонкого расщепления C и C^+ .

При изучении областей и процессов ЗО возникает множество новых вопросов, требующих своего решения, причем многие фундаментальные вопросы процесса ЗО по-прежнему остаются неразрешенными. Например, до сих пор не ясны механизмы стимуляции коллапса маломассивных дозвездных ядер и процесс формирования массивных звезд. Наряду со сферической и дисковой аккрецией здесь, видимо, включаются более сложные механизмы, такие как конкурентная аккреция и, возможно, слияние протозвездных фрагментов. В образовании системы «звезда + планеты» также много вопросов: перенос углового момента в протопланетных дисках, их физическая и химическая структура, роль перемешивания в формировании химического и минералогического состава протопланетного вещества и другие. Это обусловлено малой энергетикой процесса перехода

¹INT Photometric $H\alpha$ Survey of the Northern Galactic Plane.

«газ— звезда», особенно на начальных этапах: в протозвездных структурах (дозвездных ядрах, протопланетных газово-пылевых оболочках и лишенных газа debris-дисках) температура порядка 10 К, что соответствует излучению в субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах. субмиллиметровому и миллиметровому диапазонам. При этом структура, эволюция и другие характеристики ЗО в молекулярных облаках (эффективность, функция масс, кинематика ядер) определяются турбулентностью, на которую, помимо структурных особенностей, указывают соотношения «дисперсия скоростей— размер», «плотность— размер» и другие наблюдаемые параметры молекулярных облаков (Ballesteros-Paredes et al., 2007). Однако остаются неясными внешний и диссипативный масштабы, источники возбуждения самой турбулентности, связи между функцией масс дозвездных сгустков и начальной функцией масс звезды (НФМ), НФМ с градиентом химического состава в Галактике и с ее структурой. Миллиметровые и субмиллиметровые телескопы позволяют картографирование областей ЗО (Jørgensen et al., 2007; Motte et al., 2007), причем телескоп с болометрической решеткой и достаточно большим полем зрения позволяет провести глубокое картирование для анализа функции масс плотных сгустков, маломассивных звезд и незвездных объектов (протокоричневых карликов и планетаров — изолированных объектов планетарных масс).

В настоящее время процесс ЗО для солнцеподобных звезд принято разделять на семь стадий:

- межзвездное облако;
- фрагмент разрушающегося облака;
- прекращение фрагментации;
- образование протозвезды (начинается со стадии беззвездного ядра);
- протозвездная эволюция;
- новорожденная звезда (звезда Т Тельца или эмиссионная звезда Херbiga, окруженная газопылевым диском);
- выход на ГП.

Основным индикатором физических условий в протозвездах является распределение энергии по спектру (SED). Оно является основой современной системы классификации протозвезд и определяет их эволюционное состояние. Так, наблюдения с помощью космического инфракрасного (ИК) телескопа «Спитцер» беззвездного ядра LDN 1014 выявили слабый компактный внутренний источник с избытком излучения на длинах волн короче 70 мкм (Young et al., 2004), теоретический спектр которого, полученный с помощью разных инструментов и построенный на основании лишь нескольких точек наблюдений, имеет сложную форму (Young et al., 2004). Свойства пылинок

в беззвездных и протозвездных объектах также остаются невыясненными, и анализ детальных спектров позволит определить, к примеру, на каком этапе эволюции протозвезды происходит слияние пылинок и образование пылевых сгустков — протопланет. В беззвездных ядрах важны также наблюдения линий высокого возбуждения: из-за высокого содержания молекул CO в оболочке беззвездного ядра линии изотополога C¹⁸O на переходах (1—0) и (2—1) оказываются оптически толстыми, в отличие от линий высокого возбуждения этого изотополога (Pavlyuchenkov et al., 2007), а также линии C¹⁷O. В исследованиях из-за вымерзания приходится использовать малочисленные молекулы (с содержанием по отношению к молекулярному водороду менее 10⁻⁹) или новые молекулы и переходы, такие как молекулы, содержащие азот, среди которых не только традиционные молекулы NH₃, N₂H⁺ и HCN (Pirogov et al., 1995), но и такие, как NO (Akyilmaz et al., 2007) и HNO. А линии H₂D⁺ и других дейтеризованных молекул удобны для исследования кинематики центральных областей беззвездных ядер (van der Tak, 2006). Отметим, что в беззвездных ядрах ширины спектральных линий обычно близки к 100 мс⁻¹, что требует спектрального разрешения и точности определения лучевых скоростей около 10 мс⁻¹. Исследования внутренней структуры протозвезд, области образования биполярного истечения, его связи с ветром молодой звезды в окрестности этой области или с сильным ветром в протозвездном диске, потери углового момента, связи между выбросами и аккрецией на протозвезду в масштабах менее 1 а. е. потребуют более высокого углового разрешения, достижимого только в интерферометрическом режиме. Представляет значительный интерес и изучение околозвездных дисков (проплд), так как в них формируются экзопланетные системы. Исследования протопланетных дисков помогут раскрыть механизмы передачи углового момента в аккреционных дисках, а связанные с этим механизмом процессы перемешивания помогут объяснить особенности химического, минералогического и изотопного состава вещества протопланетного диска и Солнечной системы. Так, пылинки во внутренних областях дисков сохраняют ледяную мантию сложного молекулярного состава, что влияет как на рост планетезималей, так и на химический состав зародышей протопланет. Также важны исследования менее плотных и компактных газопылевых дисков вокруг коричневых карликов (Scholz et al., 2006), более прозрачных для ионизирующих рентгеновских и космических лучей, что ведет к их иной химической структуре. Наблюдения различных переходов и изотопологов молекул дадут возможность исследовать вертикальную

химическую и термическую структуру протопланетных дисков, степень перемешивания (Semenov et al., 2006) и условия слоевой аккреции. Кроме исследования аккреционных дисков важны наблюдения областей ускорения биполярных выбросов в непрерывном спектре, явлений прецессии дисков в гравитационном поле внешних масс, вызывающих спиралевидное искривление этих выбросов (Rudnitskij, 1995).

Массивные звезды образуются в плотных ($n \gtrsim 10^4 \text{ см}^{-3}$), холодных ($T \sim 10 \text{ K}$), турбулентных, массивных (от нескольких десятков до примерно $10^5 M_{\odot}$) сгустках внутри гигантских молекулярных облаков (ГМО) и массивных межзвездных волокон (Rosen et al., 2019). Пока нет общепринятого сценария образования таких звезд. В отличие от маломассивных звезд, доминирующих в НФМ, массивные звезды составляют по количеству около 1% звездного населения в галактиках с ЗО, но они сильнее влияют на свое окружение своими звездными ветрами, мощным излучением и последующими взрывами сверхновых. Такая обратная связь может быть ответственна за распад звездных скоплений и родительских ГМО. Однако наблюдать такое ЗО затруднительно из-за: (а) малочисленности и удаленности массивных звезд; (б) их формирования в средах с более высокими плотностями и большими дисперсиями скоростей, чем в маломассивных областях ЗО. Кроме сферической и дисковой аккреции здесь, по-видимому, действуют более сложные механизмы, например конкурентная аккреция и слияние протозвездных фрагментов. Как оказалось, галактики при повышенной температуре имеют более низкую скорость ЗО, и образующиеся звезды будут более массивными, причем в некоторых случаях это может даже привести к увеличению, а не к уменьшению образования О-звезд, несмотря на низкую скорость ЗО. До сих пор неясно, является ли ЗО большой массы просто увеличенной версией ЗО малой массы, где массивные звезды образуются в результате цельного коллапса массивных дозвездных ядер, поддерживающихся не тепловым движением, а турбулентностью и магнитными полями, или образуются в результате крупномасштабных аккреционных потоков под действием силы тяжести и сближающихся инерционных потоков, которые возникают при сверхзвуковой турбулентности из окружающего молекулярного облака. При этом мазерное излучение молекул воды (H_2O), гидроксила (ОН) и метанола (CH_3OH) (Kalenskii et al., 2006; Sobolev et al., 2007), благодаря высокой его чувствительности к физическим параметрам среды генерации, служит разделению различных эволюционных стадий молодых звездных объектов (МЗО). Так как угловые размеры мазерных источников (или пятен) меньше 10^{-3} угловой секунды, необходима интерферометрия в мазерных

линиях. Субмиллиметровые наблюдения позволят исследовать механизмы накачки таких мазеров. Например, Waters et al. (1980) и Menten and Young (1995) наблюдали в миллиметровом диапазоне (линии H_2O 183, 321, 325, 658 ГГц; CH_3OH 143, 144 ГГц и субмиллиметровые переходы) с высоким угловым разрешением источники мазерного радиоизлучения для изучения их и околозвездных структур — протопланетных дисков, джетов из молодых звезд.

Определение тригонометрических параллакса CH_3OH - и H_2O -мазеров через наблюдения методом РСДБ (радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами) является важной фундаментальной задачей и позволяет по астрономическим меркам достаточно точно измерять расстояния до областей ЗО в Галактике (до нескольких кпк от Солнца, недостижимых пока для оптических и ИК-наблюдений), в противовес недостаткам кинематического способа (неопределенность «ближнее–дальнее» расстояние для объектов внутренних частей Галактики, необходимость учета кривой вращения), что дает возможность построить пространственное 3D-распределение областей ЗО в Галактике, определить их концентрацию к спиральным рукавам и роль спиральной структуры в процессе ЗО. Например, расстояние до комплекса массивного ЗО W3 в спиральном рукаве Персея (Perseus) было определено как 2 кпк по параллаксам мазеров CH_3OH (Nachisuka et al., 2006; Xu et al., 2006). Определение расстояний до областей ЗО в далеких внешних областях Галактики (галактоцентрические расстояния до 15 кпк), как это сделано, например, для объекта, находящегося на расстоянии 5 кпк от Солнца (Honma et al., 2007), позволяет строить точную кривую вращения Галактики.

Исследования областей ЗО важно также с точки зрения астрохимии: диапазон 0.1–20 мм содержит огромное количество линий многих десятков межзвездных молекул, которые в отсутствие наблюдаемого излучения H_2 являются единственным источником информации о химическом и молекулярном составе, температуре и кинематике областей ЗО и связанных с ними молекулярных облаков. Среди более 300, не считая изотопологов, несущих редкие изотопы, молекул, идентифицированных на данный момент в МЗС и околозвездных оболочках², многие были обнаружены в диффузной МЗС, начиная от H_2 и HD (Rachford et al., 2002) и до химически сложных, как C_3 (Oka et al., 2003) и $c\text{-C}_3\text{H}_2$ (Lucas and Liszt, 2000). Многие из легких молекул, например гидридов, имеют вращательные переходы в дальнем инфракрасном и

²<https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules>.

субмиллиметровом диапазоне волн, а молекулы с длинными углеродными цепями (C_3 и более длинные) имеют вращательно-колебательные переходы в дальнем ИК-диапазоне. Детализированные с высоким угловым разрешением наблюдения молекулярного состава протозвездных объектов нужны для изучения динамики испарения ледяных мантий пылевых частиц вблизи протозвездных объектов, с вероятным образованием очень сложных молекул, в том числе простых органических молекул. Это позволит изучить возможность образования органических молекул и их перемещения в космосе, что имеет исключительно важное значение для вопроса о происхождении жизни. Исследование способности этих молекул десорбироваться (испаряться или улетучиваться) из ледяной мантии, не разрушаясь, и оценка времени жизни до их разрушения коротковолновым звездным излучением являются актуальной задачей. Детализированное изучение молекулярного состава и кинематики в окрестностях массивных молодых звезд позволит ответить на вопрос о доминирующем механизме их образования. Нужен сравнительный анализ массивных и маломассивных протозвездных объектов. Так наблюдения Pigou et al. (2007) областей массивного ЗО выявили их сложную химическую структуру, однако для количественной интерпретации этих наблюдений при помощи химико-динамических моделей требуется более высокое угловое разрешение. Синхронные наблюдения CO, C и C^+ в облаках без признаков активного ЗО (таких, как облако Маддалена (Maddalena and Thaddeus, 1985)), а также облаках с пониженным содержанием молекулярного водорода, дадут возможность следить за процессом молекуляризации CO, измерить отношения $^{12}C/^{13}C$ и $^{12}CO/^{13}CO$.

Высококонтрастные наблюдения также позволят составить карту теплового излучения пыли и изучить структуру магнитного поля в областях ЗО посредством широкополосных поляриметрических наблюдений пылевого излучения. Современные наземные приборы позволяют обнаруживать поляризацию излучения пыли только в плотных облаках. Структура магнитного поля, полученная в результате этих поляриметрических наблюдений теплового излучения пыли, не коррелирует со структурой магнитного поля в менее плотной окружающей материи, полученной на основе наблюдений тепловых молекулярных линий и звездного излучения, прошедшего через межзвездное вещество. В последнем случае это излучение также поляризуется за счет взаимодействия с ансамблем пылевых частиц, коллинеаризованных (параллельно ориентированных) локальным магнитным полем. Поляриметрические наблюдения пыли в разреженных областях молекулярных облаков могли бы позволить разрешить эту нестыковку. Как показывают

поляризационные наблюдения излучения тепловой пыли во многих областях ЗО, силовые линии магнитного поля обычно хорошо упорядочены в молекулярных облаках. Но насколько существенно противодействие магнитных полей собственной гравитации? Насколько магнитные поля коллинеаризуют и управляют молекулярными истечениями от протозвезд? Является ли роль магнитного поля более существенной при формировании звезд с малой массой, чем массивных звезд? Поскольку последние ярче, предпочиталось наблюдать области ЗО с большой массой. Очевидно, наблюдения протозвезд с малой массой потребуют большей чувствительности. Насколько сильна тенденция направления силовых линий магнитного поля в областях ЗО к плоскости Галактики и какова их напряженность? Насколько совпадают силовые линии магнитного поля в спиральных галактиках, полученные по наблюдениям эмиссии пыли (плотная МЗС) и синхротронного излучения (диффузная МЗС)? Насколько поляризация молекулярных линий в областях ЗО (Lai et al., 2003) коррелирует с поляризацией пыли и насколько поляризация пыли помогает разрешить неоднозначность поляризации CO? Наблюдать поляризацию молекулярных линий также важно, чтобы понять перенос излучения в протяженных звездных оболочках. Для ответов на эти вопросы нужен будет поляризационный обзор нескольких десятков ядер облаков в областях ЗО с однородным набором карт потоков. Это необходимо для проверки корреляций между степенью и углом вытянутости облаков и между степенью и углом поляризации. В частности, желательно исследовать ориентацию магнитных полей относительно удлинения облаков в зависимости от массы ядра облака. Поляризационные наблюдения с помощью однозеркальных телескопов, обнаруживающих заметный поток от оболочек, следует сравнивать с интерферометрическими поляризационными наблюдениями. Эти наблюдения позволяют проверить, сохраняется ли ориентация силовых линий в потоке. В частности, можно проверить корреляцию между магнитными полями и другими свойствами ядра облака и протозвезд по отношению к протозвездам с малой и большой массой по отдельности. Для решения вышеперечисленных проблем также представляется необходимым картировать магнитные поля на больших участках галактической плоскости. Для построения трехмерных 3D-моделей магнитных полей необходимы наблюдения как за напряженностью поля вдоль луча зрения (по зеемановскому расщеплению), так и за проекцией силовых линий на плоскость неба. Карты поляризации пыли в галактиках потребуют большего разрешения и чувствительности, чем сейчас. Например, типичные галактики имеют интегральную плотность потока около 100 мЯн на

расстоянии 40 Мпк на $\lambda = 1.3$ мм (Chini et al., 1995). Наблюдения в субтерагерцовом (миллиметровом и субмиллиметровом) диапазоне значительно расширили возможности более глубокого и детального изучения наиболее ранних стадий образования звезд, а также физики околосредных образований (оболочек, джетов, аккреционных дисков, экзопропланет и др.).

Подытожим, перечислив некоторые избранные актуальные и пока открытые вопросы звездообразования:

- Как образуются звезды большой массы?
- Каковы начальные условия образования звездных скоплений?
- Как образуются молекулярные облака?
- Нужны ли молекулы для образования звезд?
- Что является причиной турбулентности?
- Что запускает/регулирует звездообразование в галактических масштабах?
- Как звездообразование зависит от металличности?
- Какова роль звезд большой массы в стимулировании или подавлении образования будущих поколений звезд?
- Каковы механизмы стимуляции коллапса маломассивных дозвездных ядер?
- Являются ли системы хаб-волокна (Hub-filament systems (HFSs)) потенциальными местами формирования звездных скоплений и звезд большой массы?
- Какова эволюционная связь горячих ядер, гиперкомпактных и ультракомпактных областей Н II — представляют ли они последовательные стадии эволюции области вокруг массивной молодой звезды?
- Какова эволюция фронтов (ударных, ионизационных, диссоциационных — молекулы H_2 , испарения) вокруг массивных звездных объектов?
- Есть ли или отсутствует пыль в компактных областях ионизованного водорода вокруг молодых звезд?
- Какие стадии эволюции молодых звездных объектов сопровождаются появлением мазерного излучения?
- Какова морфология областей мазерного излучения?
- Где по отношению к молодому звездному объекту образуется мазерное излучение?

Действия для решения хотя бы части поставленных вопросов можно сформулировать так:

- 1) выявить крупномасштабные структуры (волокон), в которых формируются звезды, и изучить их свойства;

- 2) изучить физические свойства (температуру, плотность), химическую стратификацию в облаках, возникающую в результате воздействия радиационных полей (PDRs), и кинематику (распределение по скоростям);
- 3) обнаружить молекулы (в том числе органику) в диффузном межзвездном газе;
- 4) выявить новые протозвезды и молодые объекты для последующих исследований их физической структуры;
- 5) изучить влияние окружающей среды на ЗО, определить эффективность и скорость ЗО, а также ответить на все вопросы, связанные с процессом фрагментации и НФМ;
- 6) выявить объекты для последующих исследований их физической структуры;
- 7) прояснить детали потери углового (вращательного) момента и магнитного потока.

Эти действия требуют проведения наблюдений областей ЗО в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн на различных масштабах с использованием как одиночных радиотелескопов, так и радиоинтерферометров. Возможности международной радиоастрономической обсерватории (МРАО) «Суффа» в этом плане будут рассмотрены ниже.

3. ВЕРОЯТНЫЕ ОБЪЕКТЫ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ И РЕШЕНИЯ НАУЧНЫХ ЗАДАЧ

В нашей Галактике известен целый ряд ячеек и крупных областей ЗО, где наблюдается активное образование звезд и имеются много протозвезд. Однако наша цель — ограничиться областью небесной сферы, доступной с широты расположения МРАО «Суффа», а это в основном ее Северное полушарие. Поэтому нами была сделана выборка этих интенсивно изучаемых, но тем не менее требующих более детального исследования объектов. Предлагаемый первоначальный список областей ЗО для наблюдений с помощью инструментария МРАО «Суффа» представлен в Таблице 1, где даны обозначения областей ЗО, их экваториальные координаты на эпоху 2000.0 и расстояния от Солнца. Здесь следует принимать во внимание, что в зимнее время на плато Суффа более благоприятные условия для наблюдений из-за большей прозрачности атмосферы в миллиметровом диапазоне (а значит, и наилучшего предельного или минимального потока, который может быть зафиксирован от источника), связанной с минимальным значением количества осаждаемой воды (PWV) (см., например, Hojaev et al., 2007; Bubnov et al., 2017; Zinchenko et al., 2023). Поэтому «зимние» объекты будут иметь преимущества и приоритет при выделении наиболее слабых объектов в областях ЗО.



Рис. 1. Изображение молекулярного облака Персея, в котором находится множество молодых звезд. Получено космическим телескопом НАСА «Спитцер». Показывает расположение различных звездных скоплений, включая NGC 1333. Снимок получен NASA/JPL-Caltech.

Таблица 1. Список потенциальных областей ЗО для исследования на МРАО «Суффа»

№	Обозначение	RA (J2000)	Dec (J2000)	d , пк
1	NGC 1333	03 ^h 29 ^m 11 ^s .3	+31° 18' 36"	325
2	Perseus (Per MCld)	03 ^h 35 ^m 00 ^s .0	+31° 13' 00"	307
3	NGC 1499	04 ^h 03 ^m 18 ^s .0	+36° 25' 18"	300
4	Taurus	04 ^h 41 ^m 00 ^s .0	+25° 52' 00"	140–145
5	Orion (M 42)	05 ^h 35 ^m 17 ^s .3	−05° 23' 28"	412
6	Monoceros (NGC 2264)	06 ^h 41 ^m 00 ^s .0	+09° 53' 00"	720
7	Ophiuchus (S 1 в ρ Oph)	16 ^h 28 ^m 06 ^s .0	−24° 32' 30"	140
8	Aquila (M 16)	18 ^h 18 ^m 48 ^s .0	−13° 49' 00"	1700
9	Omega Nebula (M 17)	18 ^h 20 ^m 26 ^s .0	−16° 10' 36"	1700
10	W40 (Sharpless 64)	18 ^h 31 ^m 29 ^s .0	−02° 05' 24"	436
11	W43	18 ^h 47 ^m 32 ^s .4	−01° 56' 31"	5500
12	W49	19 ^h 10 ^m 17 ^s .0	+09° 06' 00"	11100
13	Vulpecula	19 ^h 44 ^m 00 ^s .0	+24° 13' 00"	1600
14	Cygnus X	20 ^h 20 ^m 00 ^s .0	+40° 00' 00"	1500
15	AFGL 2591	20 ^h 29 ^m 24 ^s .9	+40° 11' 19"	3400
16	Pelican Nebula	20 ^h 50 ^m 48 ^s .0	+44° 20' 60"	550
17	NGC 7000	20 ^h 59 ^m 17 ^s .1	+44° 31' 44"	800
18	Cepheus	22 ^h 29 ^m 00 ^s .0	+56° 36' 00"	3400

3.1. Область ЗО в Персее

Молекулярное облако Персея (Per MCld) с размером области ЗО $6^\circ \times 2^\circ$ (Ortiz-León et al., 2018) (расстояние варьируется в диапазоне 293–321 пк) — близкое (около 1000 световых лет) ГМО в созвездии Персея, содержащее более $10^4 M_\odot$ газа и пыли, занимающее площадь 12 квадратных градусов. В отличие от молекулярного облака Ориона оно почти невидимо, за

исключением двух скоплений (IC 348 и NGC 1333), где формируются маломассивные звезды, при этом очень яркое в среднем и дальнем ИК-диапазонах, а также в субмиллиметровом диапазоне из-за пыли, нагретой недавно образовавшимися звездами малой массы. На картах, сделанных спутниками IRAS и MSX, а также космическим телескопом «Спитцер» (см. рис. 1), оно демонстрирует любопытную кольцевую структуру.

Звезды формируются в молекулярном облаке

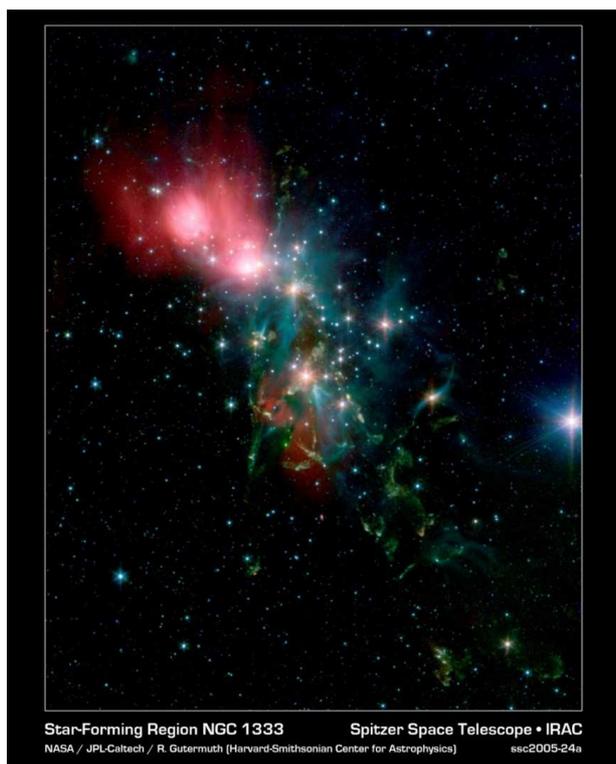


Рис. 2. Пыль на изображениях области ЗО NGC 1333 в видимом свете наблюдается как отражательная туманность, имеющая голубоватые оттенки, характерные для звездного света, отраженного пылью. В более длинных ИК-волнах светится сама межзвездная пыль, показанная красным на этом изображении космического телескопа «Спитцер» в искусственных цветах. В проникающем ИК-изображении также видны молодые звезды, которые, в противном случае, все еще были бы скрыты сформировавшимися их пылевыми облаками. Примечательно, что зеленоватые полосы и пятна, которые, кажется, разбросаны по региону, отражают свечение космических струй, вырывающихся из возникающих молодых звездных объектов, когда струи врезаются в холодный материал облаков. В целом хаотичная картина, вероятно, напоминает ту, в которой наше Солнце сформировалось более 4.5 млрд лет назад. Снимки R. A. Gutermuth (Harvard-Smithsonian CfA) и др., JPL-Caltech, NASA.

Персея (Hatchell et al., 2005), однако свет большей части звезд в видимом диапазоне поглощается проникающей всюду пылью. В NGC 1333 можно заметить контрастирующее красное излучение объектов Херbiga–Аро (HN), выбросы из недавно сформировавшихся звезд и газ, светящийся за счет энергии ударных волн. Область ЗО NGC 1333 = LBN 741 имеет размер $6' \times 3'$ (Soubiran et al., 2018), связана с темным облаком LDN 1450 Barnard 205 (рис. 2). Оценки расстояния до этой туманности колеблются в пределах 300–350 пк (Walawender et al., 2008). Она находится в западной части молекулярного облака Персея и представляет собой молодую область очень активного ЗО (Getman et al., 2002), являясь

одним из наиболее изученных объектов своего типа (Walawender et al., 2008). NGC 1333 содержит довольно типичную иерархию звездных скоплений, все еще встроенных в молекулярное облако, в котором они сформировались (Schulz, 2005). Они разделены на две основные подгруппы: на северную и южную. Большая часть ИК-излучения образует в южной части туманности.

Значительная часть звезд, видимых в ИК-диапазоне, находится на стадии эволюции до ГП (Getman et al., 2002). Область туманности имеет общую массу около $450 M_{\odot}$ (Walawender et al., 2008), в то время как скопление содержит около 150 звезд со средним возрастом в 10^6 лет и общей массой $10^2 M_{\odot}$. Средняя скорость звездообразования составляет $10^{-3} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ (Walawender et al., 2008). Внутри туманности находятся 20 молодых звездных объектов, имеющих истечения, включая объекты HN, а также в общей сложности 95 источников рентгеновского излучения, которые связаны с известными членами погруженных звездных скоплений. В NGC 1333 было обнаружено 15 объектов со спектральным классом M9 или позже, что соответствует массе объекта порядка планетарной. Примерно 42% объектов планетарной массы (ОПМ) окружены околосредным диском, но только один из шести объектов со спектральным классом L0 (масса близка к $10 M_{\text{Jup}}$) и выше имеет диск. Scholz et al. (2023) полагают, что это указывает на то, что ОПМ с очень малой массой формируются как планеты (также называемые выброшенными планетами, или субкоричневые карлики), а не как звезды. С другой стороны, Parker and Alves de Oliveira (2023) утверждают, что распределение ОПМ в NGC 1333 соответствует моделированию N -тел, которые формируются как звезды, и что ни один из ОПМ не имеет своеобразного движения, которое было предсказано для выброшенных планет. Они также отмечают, что в этой области и других областях ЗО скрываются выброшенные планеты.

3.2. Область ЗО в Орионе (M42)

Комплекс молодых звезд, дозвездных образований, их скоплений и ассоциаций со связанными с ними гигантскими молекулярными и газопылевыми облаками, включая зоны H II, расположенный на расстоянии примерно 0.5 кпк от Солнца (Reid et al., 2009), является местом наиболее активного звездообразования, видимым на северной небесной полусфере. Согласно SIMBAD, с комплексом ассоциировано более 2700 объектов, свыше половины из которых протозвезды и молодые звезды на разных этапах их эволюции.

Так, с 2004 по 2006 год произошла вспышка молодой протозвезды HOPS 383 в среднем

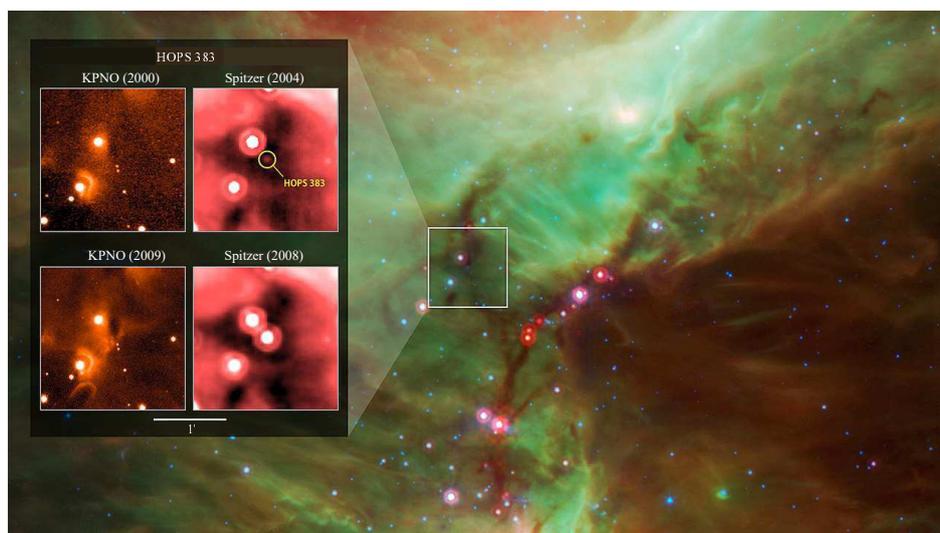


Рис. 3. Вспышка молодой протозвезды HOPS 383 в области 30 Ориона. ИК-изображения получены с помощью инструментов Национальной обсерватории Китт-Пик и четырехцветной ИК-мозаики космического телескопа «Спитцер». Снимок сделан NASA/JPL-Caltech/Univ. of Toledo: E. Safron и др.

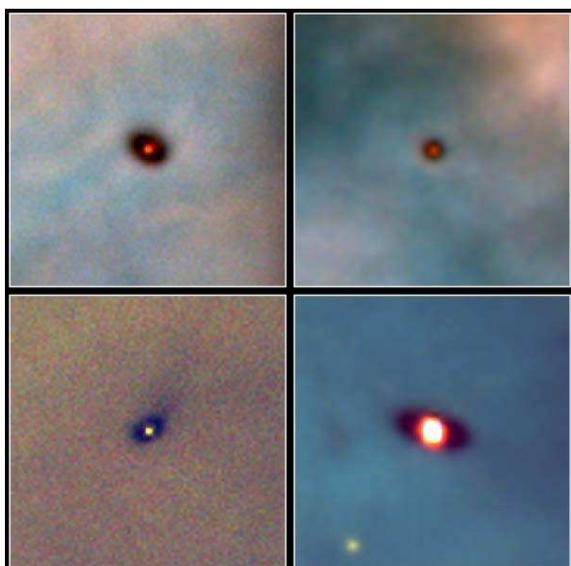


Рис. 4. Протозвезды с дисками в области 30 Орион. Каждое изображение представляет собой композицию трех изображений, полученных с помощью широкоугольной и планетарной камеры Хаббла (HST/WFC2) через узкополосные фильтры, которые пропускают свет линий излучения ионизированного кислорода (изображенного здесь синим), водорода (зеленым) и азота (красным). Снимки получены М. J. McCaughrean (MPIA), С. R. O'Dell (Rice University).

ИК-диапазоне (рис. 3), обнаруженная при сравнении данных исследования «Спитцер Орион» (на длинах волн 3.6, 4.5 и 24 мкм) десятилетней давности с наблюдениями 2010 года со спутника НАСА Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) (на длинах волн 3.4, 4.6 и 22 мкм) и при сравнении изоб-

ражения с наземных ИК-телескопов Национальной обсерватории Китт-Пик в Аризоне с данными субмиллиметрового телескопа APEX на севере Чили: увеличение магнитуды было обнаружено на 24 мкм (увеличение в 35 раз) и 4.5 мкм, а также в субмиллиметровом диапазоне (Safron et al., 2015). Через шесть лет наблюдения не показали никаких признаков затухания. Рентгеновская обсерватория Chandra также обнаружила рентгеновскую вспышку от HOPS 383 в декабре 2017 года (Grosso et al., 2020). Это было первое обнаружение рентгеновских лучей от протозвезды класса 0, которая превратится в звезду, подобную Солнцу. Фаза класса 0 недолговечна, длится примерно 1.5×10^5 лет и считается самой ранней стадией развития таких звезд, как Солнце. Вспышка длилась 3 часа 20 минут (Grosso et al., 2020). Это событие существенно повлияло на ранее предложенную схему возникновения таких явлений в эволюции протозвезды и улучшило понимание ранних стадий эволюции Солнца. Вспышка выявила скопление газа и пыли вокруг исключительно молодой горячей протозвезды HOPS 383, окруженной примерно равным по массе пылевым диском, заключенным в плотную газо-пылевую оболочку, полностью поглощающую оптическое излучение. Примеры таких дисков (проплидов) вокруг протозвезд показаны на рис. 4. Сама вспышка объясняется внезапным увеличением количества газа, который протозвезда аккрецирует из диска вокруг себя. Нестабильность диска приводит к эпизодам, когда большие количества материала перетекают на центральную протозвезду.

В точке удара у звезды образуется чрезвычайно горячая область, которая, в свою очередь, нагрее-

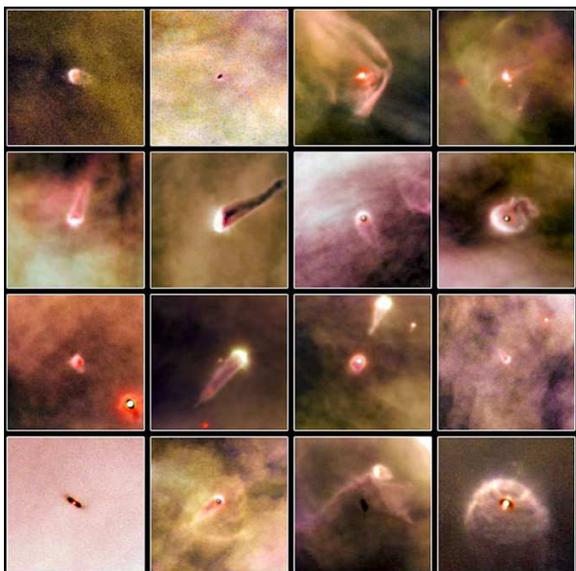


Рис. 5. Испаряющиеся протопланетные диски — проплиды (proplyds) вокруг молодых маломассивных протозвезд в области ЗО Орион. Снимки получены на HST-телескопе (Ricci et al., 2008).

вает диск, и протозвезда резко становится ярче. Представляет большой интерес и то, что в диске могут образоваться астероиды, кометы и планеты, а сами диски могут трансформироваться (см. рис. 5, Ricci et al., 2008).

3.3. Области ЗО в Лебеде

Область ЗО Лебедь-Х с радиусом 215 пк — это массивная область ЗО, расположенная за Разломом Лебеда (the Cygnus Rift), свет которой сильно поглощается межзвездной пылью. Считается, что она является задним, наиболее удаленным фронтом волны Редклифа (the Radcliffe wave) (Alves et al., 2020), включает в себя гигантское молекулярное облако с массой $3 \times 10^6 M_{\odot}$ (Schneider et al., 2006), две крупные звездные ассоциации (Cygnus OB2, Cygnus OB9) и множество глобул, нитевых структур и волокон, где происходит активное ЗО (см., например, Beerer et al., 2010; Kraemer et al., 2010). Общий ее вид показан на рис. 6.

Cygnus OB2 исследовалась в оптическом диапазоне (Massey and Thompson, 1991; Reddish et al., 1966), а ИК-наблюдения показали, что она содержит 2600 ± 400 OB-звезд и около 100 O-звезд с общей звездной массой $M_* \sim 10^5 M_{\odot}$ (Knödlseder, 2000; Comerón et al., 2002; Hanson, 2003). Долгое время считалось, что Лебедь-Х представляет собой суперпозицию ряда областей ЗО (Dickel et al., 1969). Однако детальное изучение выбросов ^{13}CO $J = 2-1$ и $J = 1-0$ привело к выводу (Schneider et al., 2006; 2007), что молекулярные облака в



Рис. 6. Область ЗО Лебедь Х. Получено с помощью NASA/JPL-Caltech/Harvard-Smithsonian CfA.

Лебеде-Х образуют связанные группы и что ассоциации Cygnus OB2 и OB1/OB9 непосредственно нагревают молекулярный материал в Лебеде-Х.

На настоящий момент 129 плотных протозвездных ядер (диаметр около 0.1 пк, масса 4–900 M_{\odot}) обнаружено с использованием линий CS (2–1) и N_2H^+ (1–0) (Motte et al., 2007; Schneider et al., 2007), из которых 40, вероятно, являются предшественниками массивных OB-звезд. Половина из них — источники ИК-излучения высокой светимости (такие как DR 21, W 75n, AFGL 2591 и S106 IR). ИК-спокойные объекты имеют очень мощные истечения, сопровождаемые интенсивным излучением SiO. Дальнейшие исследования области ЗО позволят прояснить, образуются ли звезды с малой и большой массой одновременно, проверяя теорию, требующую чтобы скопления звезд с малой массой образовывали и массивные звезды (Bonnell et al., 2004). При этом, хотя звезды с большой массой могут доминировать в энергетике Лебеда-Х, подавляющее большинство звезд, образующихся во всех областях ЗО, являются звездами с малой массой; параметры Лебеда-Х позволяют предположить, что это крупнейший питомник звезд малой массы в ближайших 2 кпк, потенциально производящий звезд больше, чем все молекулярные облака в пределах 500 пк от Солнца. Вероятно, мы являемся свидетелями развития OB-ассоциации, которая все еще находится в своем молекулярном комплексе. Масса намного больше, чем у других близлежащих молекулярных облаков с OB-ассоциациями, таких как Орион А ($10^5 M_{\odot}$, Bally et al., 1987), M 17 ($3 \times 10^5 M_{\odot}$, Elmegreen et al., 1979) или Киль ($2 \times 10^5 M_{\odot}$, Schneider and Brooks, 2004).

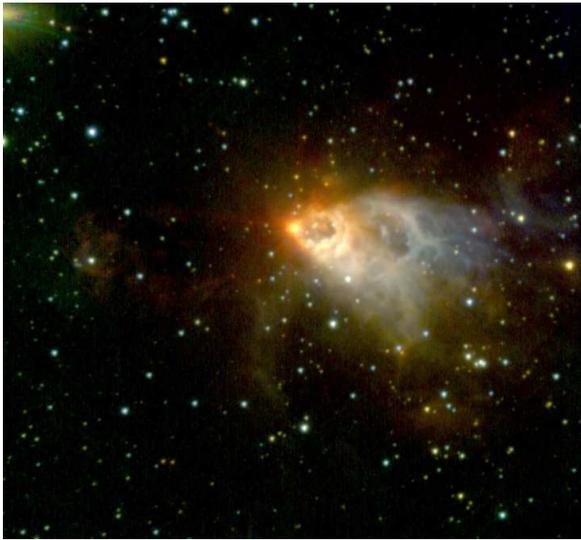


Рис. 7. Область ЗО AFGL2591. Получено на Gemini Observatory (C. Aspin).

Область ЗО AFGL2591 на расстоянии 3330 ± 110 пк (Johnston et al., 2013) имеет размер $0'.51$ (см. рис. 7). Внутри молекулярного облака формируется скопление звезд, но большая часть ИК-излучения исходит от звезды AFGL2591 VLA 3 (Sanna et al., 2012).

Область ЗО NGC 7000 (туманность Северная Америка, расстояние 795 ± 25 пк — Kuhn et al. 2020, размер $120''0 \times 100''0$) показана на рис. 8. Туманность ионизирует звезда J205551.3+435225 спектрального класса O3.5, на орбите которой находится еще одна горячая звезда (типа O8) (Maíz Apellániz et al., 2016).

Область ЗО туманность Пеликан (IC 5070 и IC 5067, расстояние около 550 пк, размер $60' \times 50'$), показанная на рис. 8b, отделена от туманности Северная Америка молекулярным газопылевым облаком на переднем плане (Froebrich et al., 2021). Обе являются частью более крупного региона H II W40. В IC 5070 особенно активно происходит ЗО. Излучение молодых звезд постепенно преобразует холодный газ в горячий и продвигает наружу фронт ионизации.

Имеются плотные волокна холодного газа, обнаружены два джета от объекта H II 555, много переменных молодых объектов (Kajdič and Raga, 2007; Bally et al., 2014; Bhardwaj et al., 2019). NGC 7000, IC 5070 и IC 5067 — это компоненты одной большой области ЗО со сложной структурой.

3.4. Область ЗО Лисичка

В эту область ЗО (размер $30' \times 40'$ — Hojaev and Zinchenko 2021) входят туманность NGC 6820

и рассеянное скопление NGC 6823, а также Sh 2-88 (Billot et al., 2010). Она содержит около 100 OB-звезд и более 800 молодых звездных объектов. Ассоциация имеет длину около 100 пк и сформирована однородно. Ядро ассоциации совпадает с молодым рассеянным скоплением NGC 6823. Большое количество ИК-источников и молекулярных струй свидетельствуют о том, что в регионе все еще активны явления ЗО. Молодые звездные объекты существуют в виде двух популяций (изолированных, лежащих за ИК-туманностью). Их число велико вокруг Sh 2-86, Sh 2-87, Sh 2-88, компактных областей H II, NGC 6823 и Cr 404 (Hojaev et al., 2003; Lata et al., 2023). Предполагается, что это вызвано триггерным звездообразованием. OB-звезды создают многие колоннообразные столбчатые структуры в этом регионе Sh 2-86 (Chapin et al., 2008; Billot et al., 2010), выступающие в направлении скопления.

Внутри области ЗО было обнаружено 49 плотных газообразных агломератов, которые можно идентифицировать с помощью субмиллиметровых наблюдений: эти скопления имеют массу от 14 до $70 M_{\odot}$, что также может породить звезды большой массы (Chapin et al., 2008). Северная часть ассоциации связана с двумя другими туманностями, меньшими по размерам, чем предыдущая; эти два облака, обозначенные как Sh 2-87 и Sh 2-88, ионизированы массивной звездой спектрального класса B0, сильно затемненной и окруженной газами самих облаков (Felli and Harten, 1981). В обоих облаках происходят явления ЗО, о чем свидетельствует наличие биполярных струй, таких как объекты H II, и водяных мазеров (Deharveng et al., 2000). В частности, более сложное строение из двух имеет облако Sh 2-88: вблизи него можно выделить два плотных туманных ядра, Sh 2-88A и Sh 2-88B. Второе ядро образовано ультракомпактной областью H II, с которой связано ионизированное облако кометного вида (Lortet-Zuckermann, 1974) с основным источником возбуждения — звездой класса B1 (Deharveng et al., 2000).

Множество компактных облаков — протозвезд — также можно найти в так называемых кометных глобулах (Reipurth, 1983). Всего в области ЗО известно 856 молодых звездных объектов, из них 239 — это, вероятно, протозвезды класса 0 и I; среди них есть 15 протозвезд, глубоко погруженных в свои родительские облака, 464 протозвезды класса II, остальные 153 — звезды III класса с очень тонким околозвездным диском (Billot et al., 2010). В облаке находится водяной мазер, связанный со струей, а кометная форма LDN 810 могла быть вызвана взаимодействием облака с ударной волной, исходящей от взрыва сверхновой, или звездным ветром более массивной компоненты или сочетанием нескольких факторов

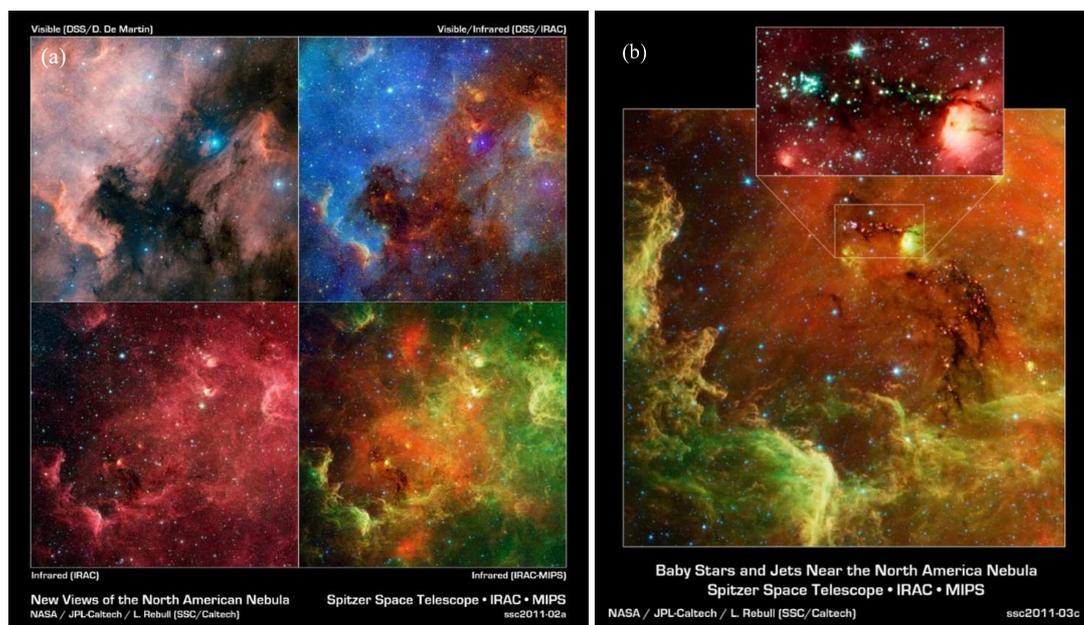


Рис. 8. Панель (а): NGC 7000 и IC 5070/IC 5067 — различные комбинации видимых и ИК-наблюдений с помощью цифрового обзора неба и космического телескопа НАСА «Спитцер» соответственно. Панель (б): ОЗ, связанная с NGC 7000. Включены данные как с ИК-камеры, так и с многодиапазонного фотометра, показывающие длины волн ИК-излучения: 3.6, 4.5, 5.8, 8 и 24 мкм. На вставке (длины волн 3.6, 4.5, 5.8 и 8 мкм) показаны струи молодых звезд, которые выглядят как зеленые полосы возле звезд. Снимки сделаны L. Rebull (NASA/JPL-Caltech).

(Turner, 1986). Много в области ЗО и ОВ-звезд (Shi and Hu, 1999; Reed, 2003), некоторые из них непосредственно способствуют ионизации близлежащих облаков Sh 2-86 и Sh 2-87, плюс 16 голубых звезд, расстояние до которых неизвестно, а следовательно, не установлено и их реальное членство в ассоциации (Billot et al., 2010). В районе ЗО чередовались два генерационных цикла. Первый произошел не позднее 2×10^6 лет назад и породил наиболее стабильные и старые звезды группы. Второе поколение, вызванное взрывом одной или нескольких сверхновых, произошло около 5×10^5 лет назад и включает в себя все звезды до ГП (Stone, 1988).

Ножаев et al. (2003) идентифицировали в общей сложности 20 кандидатов в звезды класса Хербига Ae/Be и 40 звезд типа Т Тельца (TTS), указывающих на экстремальную молодость комплекса ЗО и продолжающийся процесс ЗО в нем. Совсем недавно нами было проведено дополнительное, более глубокое исследование этого скопления в оптическом диапазоне и обнаружено множество новых переменных звезд (Lata et al., 2023). В молодом рассеянном звездном скоплении NGC 6823 нами обнаружено 88 активно-переменных звезд, из которых 72 определены нами как члены скопления: 47 — молодые звезды до ГП (восемь классических и 39 звезд типа Т Тельца со слабыми линиями — CTTS и WTTS соответственно), 25 — переменные ГП (мы классифицировали их

как переменные типа β Cep, δ Scn, EB, медленно пульсирующие В-звезды и относящиеся к новому классу переменных звезд). Нами открыты 74 новые переменные звезды и изучены 14 известных до нас переменных. Наши фотометрические данные, полученные в обсерватории Южной Аризоны (США) на автоматизированном телескопе Тенагра, были подтверждены нашим анализом данных VLDB³ TESS. Кроме этого, Zhang et al. (2020) наблюдали 27 ядер в линиях ^{12}CO , ^{13}CO и $\text{C}^{18}\text{O } J = 1-0$ и их молекулярные потоки.

3.5. Другие области звездообразования, доступные МРАО «Суффа»

Область ЗО Цефей (Cepheus) (расстояние до объекта 3400^{+220}_{-200} пк, Rate et al., 2020; размер более 500 пк, Garmany and Stencel, 1992) включает скопление NGC 7380 и ассоциацию Cep OB1 с яркими сверхгигантами HR 8752 и RW Cep (Humphreys, 1978).

Область ЗО Телец (The Taurus star-forming region) с размером 20° (Ножаев and Zinchenko, 2021) является передним фронтом волны Редклифа (Alves et al., 2020). Эта область привлекательна не только близостью и хорошими наблюдательными возможностями на широте Суффы, но и наличием

³Very Large Database.

четырёх ассоциаций молодых звезд типа Т Тельца и эмиссионных звезд Хербига, а также объектов НН, ИК-источников и других индикаторов ЗО. Многие молодые звезды и дозвездные объекты показывают повышенную активность, имеют выраженные оболочки и джеты, а также аккреционные и протопланетные диски. Мы полагаем, что наблюдения комплекса ЗО Телец на радиотелескопе РТ-70-Суффа позволят практически проверить реальные возможности оборудования на известных объектах. Рассматривая наблюдения на РТ-70, мы ориентируемся прежде всего на 3-мм окно прозрачности атмосферы. В нем сосредоточены многие наиболее информативные спектральные линии, легко наблюдаемые в относительно холодных протозвездах.

Область ЗО Единорог с размером $20'$ и расстоянием 719 ± 16 пк (Maíz Apellániz, 2019) центрируется вокруг молодого скопления NGC 2264, где отношение числа звезд и коричневых карликов составляет $1 : (2.5-7.5)$ (Pearson et al., 2021). В этой области ЗО обнаружено много компактных протозвездных объектов, часть из которых образуют скопление, биполярные джеты, свидетельства индуцированного ЗО, подробно описанных нами в Nojaev and Zinchenko (2021).

Области ЗО в Орле включают несколько разнородных компонент.

W43 (расстояние $5.49^{+0.39}_{-0.34}$ кпк по измерениям мазерных параллакс — Zhang et al., 2014, размер $6'3$) — активная область ЗО Галактики, скрытая межзвездной пылью и содержащая массивные протозвезды, а также формирующиеся звездные скопления, встроенные в туманность (Bally et al., 2010). В центре W43 находится плотное и массивное звездное скопление с несколькими O-звездами и звездами Вольфа-Райе (Blum et al., 1999).

W49 имеет газообразные молекулярные истечения, а также мазеры H_2O (воды). В центральном скоплении этой области ЗО (Wu et al., 2014, 2016) обнаружены очень массивные звезды: W49nr1=[WBB2016]1 со светимостью около $10^6 L_{\odot}$ и начальной массой от 100 до $180 M_{\odot}$ и [WBB2016]2 с массой $250 M_{\odot}$.

Область ЗО в Змее W40 (расстояние 436 ± 9 пк определено Ortiz-León et al., 2017, размер $8'$ — Kuhn et al. 2010), показанная на рис. 9, проецируется на небо в направлении Разлома Змеи—Орла, комплекса темных облаков над плоскостью Галактики в созвездиях Орла, Змеи и восточного Змееносца (Straižys et al., 1996). Это одно из ближайших мест формирования массивных звезд O- (IRS 1A South) и B-типа (IRS 2B, IRS 3A и IRS 5), а IRS 1A North и IRS 2A являются звездами Хербига Ae/Be (Shuping et al., 2012), ионизирующее излучение которых создало ультракомпактные области Н II (Vallee, 1987; Rodríguez



Рис. 9. Изображение области ЗО W40, полученное с помощью ИК-камеры телескопа «Спитцер» (IRAC) в 3.6, 4.5, 5.8 и 8.0 мкм (показаны синим, зеленым, оранжевым и красным соответственно). Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) возбуждаются межзвездным излучением и становятся люминесцентными на длинах волн около 8.0 мкм, придавая туманности красноватые черты. Получено NASA/JPL-Caltech.

et al., 2010). В этой области межзвездный газ, образующий диффузную туманность, окружает скопление из около 520 молодых звезд с массой до $0.1 M_{\odot}$ (Rodney and Reipurth, 2008; Kuhn et al., 2010, 2015; Mallick et al., 2013).

Изучение процессов ЗО внутри этой области (Kuhn et al., 2010; Shimoikura et al., 2015; Rumble et al., 2016) показало, что W40 находится рядом с несколькими другими близкими по расстоянию областями ЗО на небе, включая темное ИК-облако (Gutermuth et al., 2008) и молодое звездное скопление, которые являются частями одной и той же более крупномасштабной области ЗО (Ortiz-León et al., 2017).

Оценки показывают, что возраст звезд в центре скопления составляет примерно 0.8×10^6 лет, а звезды снаружи немного старше: 1.5×10^6 лет (Getman et al., 2014). Скопление имеет примерно сферическую симметрию и разделено по массе, причем более массивные звезды относительно чаще встречаются вблизи центра скопления (Kuhn et al., 2010). Причина массовой сегрегации в очень молодых звездных скоплениях, таких как W40, до сих пор является открытым вопросом в теории ЗО, поскольку временные рамки для массовой сегрегации в результате двухчастичных взаимодействий между звездами обычно слишком велики (Küpper et al., 2011; Krumholz, 2014). Избыток в ИК-диапазоне указывает на то, что у ряда звезд в скоплении есть околозвездные диски, которые, возможно, находятся в процессе формирования планет (Kuhn et al., 2010). Наблюдения на миллиметрах с 30-м телескопа IRAM показывают девять протозвезд класса 0 в районе «Юг Змеи» и три

протозвезды класса 0 в W40 (Maury et al., 2011), подтверждая мнение о том, что этот регион очень молодой и активно образует звезды.

W40 находится в молекулярном облаке с предполагаемой массой $10^4 M_{\odot}$ (Rodney and Reipurth, 2008). Ядро облака наблюдалось также в радиоизлучении CO, что позволяет оценить массу ядра в $200\text{--}300 M_{\odot}$. Из ядра вытекает слабый биполярный поток газа, вероятно, вызванный молодым звездным объектом, скорость двух лепестков которого различается на 0.5 км с^{-1} (Zhu et al., 2006). Именно в этом регионе впервые было отмечено поразительное преобладание нитевидных облачных структур, наблюдаемое космической обсерваторией Гершель (Herschel Space Observatory — HSO) (André et al., 2010). Они имеют встроенные в них плотные «ядра», многие из которых, вероятно, гравитационно коллапсируют и образуют звезды.

Результаты HSO для этой области и для других областей ЗО показывают, что фрагментация волокон молекулярного облака имеет фундаментальное значение для процесса ЗО. Так, сравнение молекулярных облаков W40 и Разлома Орла с молекулярными облаками в районе Полярной звезды указывает на то, что ЗО происходит, когда линейная плотность (масса на единицу длины) превышает порог, делающий их восприимчивыми к гравитационной нестабильности. Этим объясняется высокая скорость ЗО в W40 и Разломе Орла, в отличие от низкой скорости ЗО в облаках Полярной звезды. Эти результаты наблюдений дополняет компьютерное моделирование ЗО, также подчеркивающее роль, которую нити молекулярных облаков играют в рождении звезд (Bate et al., 2003). Наблюдения же космической рентгеновской обсерватории Chandra показали диффузное рентгеновское свечение из области Н II, которое, вероятно, связано с наличием плазмы с $T \sim 10^6 \text{ К}$ (Kuhn et al., 2010; Townsley et al., 2014). Такая горячая плазма может образовываться ветрами массивных звезд, которые нагреваются от ударной волны.

M 16/NGC 6611, или туманность Орел (расстояние $1740 \pm 130 \text{ пк}$ (Kuhn et al., 2019), размер $70' \times 50'$). Туманность Орел (рис. 10) является частью области Н II IC 4703 и содержит несколько активных областей ЗО, включая известные «Столпы Творения». Скопление NGC 6611, связанное с туманностью, имеет около 8100 звезд, большая часть которых сосредоточена в разрыве молекулярного облака к северо-западу от «Столпов» (Kuhn et al., 2015). Самая яркая звезда (HD 168076) — это двойная звезда, состоящая из звезды O3.5 V и компаньона O7.5 V (Sana et al., 2009), имеющая приблизительную массу $80 M_{\odot}$, светимость около $10^6 L_{\odot}$, а возраст скопления оценивается в $(1\text{--}2) \times 10^6 \text{ лет}$ (Hillenbrand et al., 1993).



Рис. 10. Область ЗО M 16. Получено с помощью камеры Wide-Field Imager на 2.2-м телескопе MPG/ESO в обсерватории La Silla в трех фильтрах: *B* (синий), *V* (зеленый) и *R* (красный).

Область ЗО Стрелец представлена объектом M 17/NGC 6618, или туманностью Омега (расстояние 1700 пк , размер $11'$ или 4.6 пк). Мозаика из разномасштабных изображений этой области ЗО показана на рис. 11. Облако межзвездного вещества, частью которого является эта туманность, имеет диаметр около 12.3 пк и массу $3 \times 10^4 M_{\odot}$, тогда как масса самой туманности Омега оценивается в $800 M_{\odot}$ (Povich et al., 2009). Она считается одной из самых ярких и массивных областей ЗО в нашей Галактике (Povich et al., 2009). Ее картинная геометрия похожа на туманность Ориона (M 42), за исключением того, что она видна в профиль (с ребра), а не анфас (Broos et al., 2007). При этом считается, что туманность Омега значительно богаче материалом для ЗО и молодыми звездами, чем M 42, однако она намного дальше. Рассеянное скопление NGC 6618 находится внутри туманности, которая переизлучает свет горячих молодых звезд (таких как HD 168607, HD 168625); реальное количество звезд в туманности около 800, 100 из которых спектрального класса раньше чем B9 и девять спектрального класса O, плюс более тысячи звезд в стадии формирования в ее внешних областях (Povich et al., 2009). Это также одно из самых молодых известных скоплений, возраст которого составляет всего 10^6 лет (Hanson et al., 1997). Обычно с ней связывают светящуюся голубую переменную HD 168607, находящуюся в юго-восточной части туманности; ее близкий сосед,

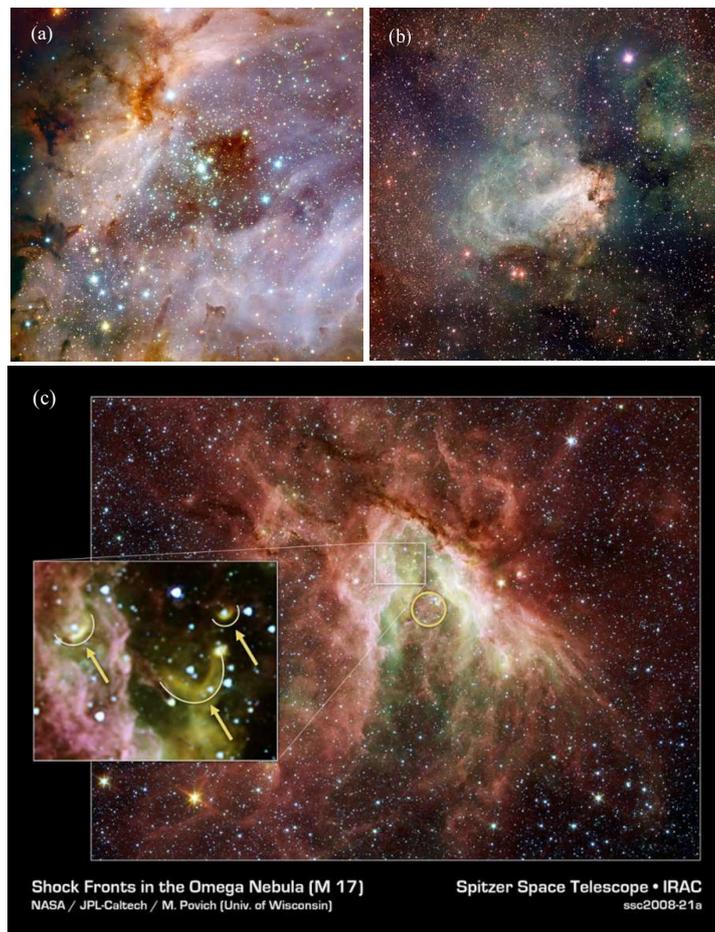


Рис. 11. Панель (а): центральная часть М 17 (наблюдения VLT/ISAAC). Использовались фильтры J (1.25 мкм, синий цвет), H (1.6 мкм, зеленый цвет) и K (2.2 мкм, красный цвет). Снимок сделан R. Chini. Панель (b): общий вид М 17. Получено с помощью ESO/INAF-VST/OmegaCAM. Панель (c): М 17 с центральной группой самых массивных звезд региона (см. желтый кружок). Эти звезды испускают интенсивные потоки расширяющегося газа, которые образуют глубокий карман в центре изображения. Ветры от других массивных звезд региона взаимодействуют с ними, образуя ударные волны. Головные ударные волны в форме полукругов изгибаются в сторону от звездных ветров центральных массивных звезд. Это четырехцветный композит, в котором свет с длиной волны 3.6 мкм имеет голубой цвет; 4.5 мкм — зеленый; 5.8 мкм — оранжевый и 8 мкм — красный. Пыль имеет красный цвет, горячий газ — зеленый, а белый виден там, где смешиваются газ и пыль. Снимок был сделан с помощью ИК-камеры телескопа «Спитцер». Снимок получен NASA/JPL-Caltech/М. Povich (University of Wisconsin).

голубой гипергигант HD 168625, возможно, тоже относится к ней.

Область ЗО Змееносец охватывает звезду S1 и ее окружение (расстояние до объекта 140 пк (Bontemps et al., 2001), размер $4^{\circ}5 \times 6^{\circ}5$ (Loren, 1989)), вид которой показан на рис. 12. Надо отметить, что область вокруг Змееносца относится к структурам, не входящим в состав волны Рэдклиффа (Alves et al., 2020). Она состоит из двух основных областей плотного газа и пыли. Первая содержит облако ЗО (L1688) и два волокна (L1709 и L1755), а вторая — область ЗО (L1689) и волокно (L1712–L1729). Эти нити простираются до 10–17.5 пк в длину и могут достигать ширины 0.24 пк. Стримеры ρ Змееносца обозначаются как

Барнард 44 и 45. Некоторые из структур внутри комплекса ЗО, по-видимому, являются результатом ударного фронта, проходящего через облако со стороны соседней ассоциации Sco OB2 (Loren, 1989). Температура облаков колеблется в пределах 13–22 К, а общая масса материала примерно $3 \times 10^3 M_{\odot}$. Более половины массы комплекса сосредоточено вокруг облака L1688, и это наиболее активная область ЗО (Loren, 1989). Всего возле облака L1688 обнаружено 425 ИК-источников (Wilking and Lada, 1983). Предполагается, что это молодые звездные объекты, в том числе 16, классифицированных как протозвезды, 123 звезды Т Тельца (CTTS) с плотными околзвездными дисками и 77 более слабых звезд Т Тельца (WTTS)



Рис. 12. Область ЗО Змееносца и звезда S1, появляющаяся среди светящейся каверны, которую она выдувает своим звездным ветром (см. нижнюю половину изображения). Газ более светлого цвета, окружающий S1, состоит из полициклических ароматических углеводородов, семейства молекул на основе углерода. Получено с помощью NASA/Webb, ESA, CSA, STScI, K. Pontoppidan (STScI), A. Pagan (STScI).

с более тонкими дисками (Bontemps et al., 2001). Возраст последних двух типов звезд варьируется от 10^5 до 10^6 лет (Luhman and Rieke, 1999). коричневым карликом, обнаруженным в области ЗО Змееносца, был J162349.8–242601, расположенный в облаке ρ Змееносца (Martín, 2001), у которого формируется околозвездный диск, видимый почти с ребра. Первым коричневым карликом был J162349.8–242601, расположенный в облаке ρ Змееносца (Martín, 2001). Возле него формируется околозвездный диск, видимый почти с ребра. Его диаметр составляет 300 а. е., а масса как минимум в два раза больше M_{Jup} . Звезда возрастом 10^6 лет в центре диска имеет $T \sim 3000$ К и светимость $0.4 L_{\odot}$.

4. ОЦЕНКА НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

4.1. Прозрачность атмосферы на миллиметровых волнах на плато Суффа

Возможность астрономических наблюдений на миллиметровых и субмиллиметровых волнах в том или ином месте в значительной мере определяется статистикой атмосферной прозрачности в этом диапазоне, которая, в свою очередь, зависит от содержания воды в атмосфере, как в виде водяного пара, так и в виде жидкой фракции (в облаках).

Существенным (но почти постоянным во времени) является и поглощение молекулами кислорода. Вклад остальных атмосферных составляющих незначителен. Абсолютное содержание и водяного пара, и кислорода уменьшается с высотой. Кроме того, с высотой уменьшаются и их удельные коэффициенты поглощения в окнах прозрачности атмосферы. Поэтому, естественно, обсерватории, предназначенные для работы в коротковолновой части миллиметрового и особенно субмиллиметрового диапазонов, строят высоко в горах. Высота площадки строительства 70-м радиотелескопа на плато Суффа составляет 2400 м, что сравнимо с расположением 30-м радиотелескопа IRAM на Пико Велета (2850 м) и 12-м радиотелескопа ARO на Кит Пик (1900 м), оба из которых участвуют в проекте ТГС в диапазоне длин волн 1.3 мм. Планируется расширение ТГС (Doeleman et al., 2023), и плато Суффа рассматривается как одно из возможных мест установки новых антенн (Raymond et al., 2021).

На площадке строительства РТ-70 на плато Суффа с 2014 года проводился мониторинг атмосферного поглощения в диапазонах длин волн 3 и 2 мм при помощи разработанного в ИПФ РАН специализированного двухдиапазонного радиометра (Bubnov et al., 2017). Результаты мониторинга в диапазоне длин волн 2 мм хорошо согласуются с оценками поглощения по глобальной модели атмосферы и с данными о содержании водяного пара в атмосфере (Bubukin et al., 2023). В измерениях на волне 3 мм имелись инструментальные проблемы (Bubnov et al., 2017). В целом эти результаты показывают, что на данной площадке возможные регулярные эффективные радиоастрономические наблюдения на длинах волн до 2 мм. На более коротких волнах возможны лишь эпизодические наблюдения, в основном в зимний период (Zinchenko et al., 2023).

4.2. Наблюдения с 70-м радиотелескопом

Строительство 70-м радиотелескопа миллиметрового диапазона длин волн РТ-70 на плато Суффа (Hojaev and Shanin, 1997; Hojaev et al., 2007; Artemenko et al., 2019) началось в 1980-х годах, но в дальнейшем было заморожено. Можно оценить возможности наблюдений астрономических объектов с помощью этого инструмента в случае завершения строительства, основываясь на его плановых характеристиках.

Основная часть рассмотренных выше научных задач связана с наблюдениями спектральных линий. В работе Hojaev and Zinchenko (2021) нами было показано, что для получения полной (по Найквисту) карты площадки в 1 квадратную угловую

минуту, с учетом калибровок и проверок наведения при чувствительности 0.3 К (в шкале яркостных температур) в полосе 1 км с^{-1} в диапазоне длин волн 3 мм, потребуется около 10 минут. Такая чувствительность даст возможность наблюдать сравнительно сильные линии с яркостной температурой $T_b \gtrsim 1 \text{ К}$, такие, например, как линии молекул CO, ^{13}CO , C^{18}O , CS, HCN, HCO^+ и др. Спектральное разрешение в 1 км с^{-1} позволит измерять интегральную интенсивность линий, но оно недостаточно для исследования особенностей профилей линий (например, деталей самопоглощения). В темных холодных облаках ширина линий может быть заметно меньше 1 км с^{-1} . Для их детектирования следует использовать более высокое разрешение. Мы рассматриваем лишь диапазон длин волн 3 мм, поскольку на более коротких волнах эффективность 70-м антенны, видимо, будет быстро падать.

Ожидаемая ширина основного лепестка диаграммы направленности РТ-70 на уровне половины интенсивности на этой длине волны около $10''$. Картирование площадки $20' \times 20'$ займет около 70 часов. Эти оценки сделаны для однолучевого приемника. Для исследований протяженных источников все более широко применяются матричные приемники с большим числом элементов, что, соответственно, позволяет сократить время наблюдений. При этом оптическая схема телескопа должна обеспечивать достаточно большое поле зрения. Такой подход реализуется, например, в проектах SSAT/FYST (Aravena et al., 2023; Stacey et al., 2022) и AtLAST (Klaassen et al., 2020). Оптическая схема РТ-70 также предусматривает достаточно большое поле зрения. Надо, впрочем, отметить, что пока созданы лишь матрицы болометров с очень большим числом элементов (порядка 10^4). Разработка же матричных гетеродинных приемников с числом элементов больше чем 10 представляет собой очень сложную и пока не решенную техническую проблему.

Матрицы болометров позволяют решать задачи, связанные с наблюдениями излучения пыли, включая поляризацию. Однако излучение пыли в диапазоне длин волн 3 мм слишком слабо, обычно такие измерения проводятся на длинах волн около 2 мм и короче. Примерами подобных матриц, которые активно используются в настоящее время, являются NIKA2 на 30-м радиотелескопе IRAM (Perotto et al., 2020) и TolTEC на 50-м радиотелескопе LMT (Large Millimeter Telescope) (Wilson et al., 2020).

Можно ввести понятие скорости сканирования при помощи матрицы болометров, определив ее как площадь на небе, которую возможно прокартировать с дисперсией 1 мЯн^2 за 1 час (Perotto et al.,

2020):

$$M_s = \eta \frac{\pi}{4} d_{\text{FOV}}^2 \frac{1}{\text{NEFD}^2}, \quad (1)$$

где NEFD — эквивалентная шуму плотность потока (Noise Equivalent Flux Density), d_{FOV} — диаметр поля зрения матрицы, η — доля работающих детекторов в матрице. Скорость M_s при этом выражается в $(\text{угл. мин.})^2 \text{ мЯн}^{-2} \text{ ч}^{-1}$. Для инструмента NIKA2 с полем зрения 6.5 на 30-м радиотелескопе IRAM эта скорость оценивается в 1388 ± 174 и $111 \pm 11 (\text{угл. мин.})^2 \text{ мЯн}^{-2} \text{ час}^{-1}$ на 2 мм и на 1.15 мм соответственно (Perotto et al., 2020). Эти оценки не учитывают поглощение в атмосфере. Скорость сканирования для инструмента TolTEC на 50-м радиотелескопе LMT, который работает примерно на тех же длинах волн, по крайней мере на порядок величины выше⁴.

Как показано ранее, на плато Суффа на длинах волн короче 2 мм возможны лишь эпизодические наблюдения в зимний период.

4.3. Наблюдения с радиотелескопом диаметром 15–20 м

Ввиду сложностей с завершением строительства РТ-70, в качестве возможного варианта рассматривается строительство антенны диаметром 15–20 м. Скорость картирования источника при сохранении требований к чувствительности по яркостной температуре и при том же коэффициенте рассеяния вне основного лепестка растет пропорционально телесному углу основного лепестка диаграммы направленности. Таким образом, для антенны диаметром 20 м она будет примерно на порядок выше, чем для 70-м антенны. Но конечно, угловое разрешение в полученной карте будет примерно в три раза хуже. Несмотря на это, такая антенна позволит решать большинство научных задач, рассматриваемых для 70-м антенны, за исключением изучения структур (например, плотные ядра в молекулярных облаках), из-за угловых размеров которых требуется использование более крупной антенны.

Но при этом с такой антенной будет легче реализовать наблюдения на более коротких волнах, что позволит улучшить угловое разрешение, а также даст возможность наблюдать дополнительные переходы различных молекул, что важно для анализа физических условий в источниках. Предполагается также, что такая антенна будет работать в режиме РСДБ совместно с другими подобными антеннами на территории РФ (см., например, Stolyarov et al., 2024).

⁴http://toltec.astro.umass.edu/using_toltec.php

4.4. Наблюдения с решеткой небольших антенн

Еще одним возможным вариантом является строительство интерферометра из сравнительно небольших (диаметром 3–8 м) антенн (см., например, Likhachev et al., 2024). Чувствительность одного элемента интерферометра обычно характеризуется эквивалентной плотностью потока (SEFD — System Equivalent Flux Density):

$$\text{SEFD} = \frac{2kT_{\text{SYS}}}{A_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

где T_{SYS} — шумовая температура системы, A_{eff} — эффективная площадь антенны, k — постоянная Больцмана. Предполагая $T_{\text{SYS}} \sim 100$ К и коэффициент использования поверхности (КИП) около 0.7, получим SEFD от 8000 до 60 000 Ян. Для системы из 10 антенн ожидаемая чувствительность в полосе 1 км с^{-1} на длине волны 3 мм составит $2\text{--}10 \text{ Ян л}^{-1}$ за время интегрирования 1 с. При ожидаемой протяженности антенной решетки несколько сотен метров угловое разрешение составит на этой длине волны $2''\text{--}3''$. При таком разрешении чувствительность по яркостной температуре будет не лучше чем 30 К за время интегрирования 1 с. Чувствительность 0.3 К, предполагавшаяся выше, может быть достигнута за время порядка трех часов.

В то же время ширина первичной диаграммы направленности одной антенны будет составлять $90''\text{--}230''$ и информация будет получаться во всей этой области одновременно. Картирование площадки $20' \times 20'$ потребует нескольких месяцев. Нужно также отметить, что интерферометр не чувствителен к протяженному излучению на масштабах порядка и более λ/D_{min} , где D_{min} — минимальная проекция базы между антеннами. В рассматриваемом случае наибольший угловой масштаб будет порядка угловой минуты.

Следует подчеркнуть, что матрицы болометров на интерферометрах не используются и, таким образом, наблюдения в континууме с высокой чувствительностью, включая поляризацию, возможны только при очень широкой полосе приема гетеродинных приемников (что реализуемо в настоящее время). В целом такая антенная решетка больше подходит для детальных исследований сравнительно компактных областей в протяженных облаках, чем для картирования таких облаков целиком.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Описанные выше области ЗО весьма разнообразны, в них находится большое число объектов на разных стадиях эволюции. Детальные исследования этих областей позволят значительно продвинуться в решении проблем, перечисленных

в разделе 2. Размеры большинства этих областей весьма велики. Наблюдения их целиком с высоким разрешением (например, таким, как ожидается для 70-м антенны) и при этом с высокой чувствительностью по яркостной температуре практически невозможны, поскольку потребуют очень много времени. Оптимальной стратегией представляется картирование со сравнительно низким угловым разрешением и дальнейшие исследования избранных участков с более высоким разрешением. Требования к разрешению зависят от задач и типа исследуемого объекта. Одна угловая секунда соответствует линейному размеру около 1000 а. е. на расстоянии 1 кпк и примерно 100 а. е. на расстоянии 100 пк. Угловое разрешение 10 мсд, которое достигается на ALMA, позволяет детально изучать протопланетные диски, находящиеся на расстояниях около 100 пк (см., например, Brogan et al., 2015), и близкие окрестности массивных протозвезд на расстояниях в несколько килопарсек (см., например, Zinchenko et al., 2024). При этом вполне конкурентоспособные результаты получают и с помощью субмиллиметровой решетки (Submillimeter Array — SMA), которая имеет угловое разрешение хуже более чем на порядок величины (см., например, Zinchenko et al., 2012; 2015). Субмиллиметровая решетка состоит из восьми антенн диаметром 6-м с максимальной базой около 500 м, и что-то подобное, в принципе, могло бы быть реализовано на МРАО «Суффа». Для исследования мазерных источников используются методы РСДБ, в частности на наземно-космических базах. МРАО «Суффа» должна иметь возможность участвовать в таких экспериментах, в том числе совместно с планируемой космической обсерваторией «Миллиметрон» (Novikov et al., 2021).

Для эффективной работы любого проектируемого инструмента обсерватории требуется обеспечить максимально широкую полосу приема. Это позволит принимать одновременно большое число спектральных линий и добиться высокой чувствительности в континууме. Большое число линий важно не только для астрохимических исследований, но и для оценок физических параметров источников. Современные технологии позволяют реализовать полосы приема около 30 ГГц, что дает возможность одновременно наблюдать наиболее важные линии в 3- или 2-мм окне прозрачности атмосферы. Для изучения магнитного поля важно иметь возможность поляризационных измерений. Здесь нет принципиальных проблем.

В целом любой из рассмотренных вариантов миллиметрового телескопа на плато Суффа будет конкурентоспособен на мировом уровне и даст участникам проекта возможность развивать соответствующие научные направления.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на значительный прогресс в исследовании процессов ЗО, достигнутый к настоящему времени, многие фундаментальные вопросы остаются нерешенными. В данной работе рассмотрены актуальные задачи исследований процессов ЗО. Описаны объекты, доступные для наблюдений на плато Суффа, которые можно использовать для решения этих задач. Проанализированы возможности различных инструментов, которые могут быть построены на этой площадке. Среди них — 70-м антенна, строительство которой было начато много лет назад, но пока так и не закончено; антенна меньшего диаметра, 15–20 м; антенная решетка, состоящая из небольших антенн. Размеры большинства предлагаемых для исследования областей ЗО весьма велики. Оптимальной стратегией представляются картирование их со сравнительно низким угловым разрешением и дальнейшие исследования избранных участков с более высоким разрешением. Создание любого из рассмотренных инструментов будет способствовать развитию соответствующих научных направлений и позволит получить важные астрофизические результаты.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны анонимному рецензенту за полезные замечания и предложения. В настоящей статье использованы базы данных CDS (<http://cdsportal.u-strasbg.fr/>) и SAO/NASA ADS (<https://ui.adsabs.harvard.edu/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках базового государственного финансирования лаборатории Галактической астрономии Астрономического института Академии наук Республики Узбекистан, а также в рамках госзадания ИПФ РАН (тема FFUF-2024-0028).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Akyilmaz, D. R. Flower, P. Hily-Blant, et al., *Astron. and Astrophys.* **462** (1), 221 (2007). DOI:10.1051/0004-6361/20066131
2. J. Alves, C. Zucker, A. A. Goodman, et al., *Nature* **578** (7794), 237 (2020). DOI:10.1038/s41586-019-1874-z
3. P. André, A. Men'shchikov, S. Bontemps, et al., *Astron. and Astrophys.* **518**, id. L102 (2010). DOI:10.1051/0004-6361/201014666
4. Aravena et al. (CCAT-Prime Collab.), *Astrophys. J. Suppl.* **264** (1), id. 7 (2023). DOI:10.3847/1538-4365/ac9838
5. Y. N. Artemenko, Y. Y. Balega, A. M. Baryshev, et al., in *Proc. 30th Intern. Symp. on Space Terahertz Technology (ISSTT 2019), Gothenburg, Sweden, 2019*, pp. 196–201. Online at <https://www.nrao.edu/meetings/isstt/proceed/2019Proceedings.pdf>
6. J. Ballesteros-Paredes, R. S. Klessen, M. M. Mac Low, and E. Vazquez-Semadeni, in *Protostars and Planets V*, Ed. by B. Reipurth, D. Jewitt, and K. Keil (University of Arizona Press, Tucson, 2007), p. 63. DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/0603357
7. J. Bally, L. D. Anderson, C. Battersby, et al., *Astron. and Astrophys.* **518**, id. L90 (2010). DOI:10.1051/0004-6361/201014596
8. J. Bally, A. Ginsburg, R. Probst, et al., *Astron. J.* **148** (6), article id. 120 (2014). DOI:10.1088/0004-6256/148/6/120
9. J. Bally, W. D. Langer, A. A. Stark, and R. W. Wilson, *Astrophys. J.* **312**, L45 (1987). DOI:10.1086/184817
10. M. R. Bate, I. A. Bonnell, and V. Bromm, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **339** (3), 577 (2003). DOI:10.1046/j.1365-8711.2003.06210.x
11. I. M. Beerer, X. P. Koenig, J. L. Hora, et al., *Astrophys. J.* **720** (1), 679 (2010). DOI:10.1088/0004-637X/720/1/679
12. T. A. Bell, E. Roueff, S. Viti, and D. A. Williams, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **371** (4), 1865 (2006). DOI:10.1111/j.1365-2966.2006.10817.x
13. A. Bhardwaj, N. Panwar, G. J. Herczeg, et al., *Astron. and Astrophys.* **627**, id. A135 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201935418
14. N. Billot, A. Noriega-Crespo, S. Carey, et al., *Astrophys. J.* **712** (2), 797 (2010). DOI:10.1088/0004-637X/712/2/797
15. R. D. Blum, A. Damineli, and P. S. Conti, *Astron. J.* **117** (3), 1392 (1999). DOI:10.1086/300791
16. I. A. Bonnell, S. G. Vine, and M. R. Bate, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **349** (2), 735 (2004). DOI:10.1111/j.1365-2966.2004.07543.x
17. S. Bontemps, P. André, A. A. Kaas, et al., *Astron. and Astrophys.* **372**, 173 (2001). DOI:10.1051/0004-6361:20010474
18. C. L. Brogan et al. (ALMA Partnership), *Astrophys. J.* **808** (1), L3 (2015). DOI:10.1088/2041-8205/808/1/L3
19. P. S. Broos, E. D. Feigelson, L. K. Townsley, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **169** (2), 353 (2007). DOI:10.1086/512068
20. G. M. Bubnov, Y. N. Artemenko, V. F. Vdovin, et al., *Radiophysics and Quantum Electronics* **59** (8–9), 763 (2017). DOI:10.1007/s11141-017-9745-7

21. I. T. Bubukin, I. V. Rakut, M. I. Agafonov, et al., *Radiophysics and Quantum Electronics* **65** (10), 719 (2023). DOI:10.1007/s11141-023-10252-0
22. E. B. Burgh, K. France, and S. R. McCandliss, *Astrophys. J.* **658** (1), 446 (2007). DOI:10.1086/511259
23. E. L. Chapin, P. A. R. Ade, J. J. Bock, et al., *Astrophys. J.* **681** (1), 428 (2008). DOI:10.1086/588544
24. R. Chini, E. Kruegel, R. Lemke, and D. Ward-Thompson, *Astron. and Astrophys.* **295**, 317 (1995).
25. F. Comerón, A. Pasquali, G. Rodighiero, et al., *Astron. and Astrophys.* **389**, 874 (2002). DOI:10.1051/0004-6361/20020648
26. L. Deharveng, D. Nadeau, A. Zavagno, and J. Caplan, *Astron. and Astrophys.* **360**, 1107 (2000).
27. H. R. Dickel, H. Wendker, and J. H. Bieritz, *Astron. and Astrophys.* **1**, 270 (1969).
28. S. S. Doeleman, J. Barrett, L. Blackburn, et al., *Galaxies* **11** (5), id. 107 (2023). DOI:10.3390/galaxies11050107
29. B. G. Elmegreen, C. J. Lada, and D. F. Dickinson, *Astrophys. J.* **230**, 415 (1979). DOI:10.1086/157097
30. M. Felli and R. H. Harten, *Astron. and Astrophys.* **100**, 42 (1981).
31. D. Froebrich, E. Derezea, A. Scholz, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **506** (4), 5989 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2082
32. C. D. Garmany and R. E. Stencel, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **94**, 211 (1992).
33. K. V. Getman, E. D. Feigelson, and M. A. Kuhn, *Astrophys. J.* **787** (2), article id. 109 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/787/2/109
34. K. V. Getman, E. D. Feigelson, L. Townsley, et al., *Astrophys. J.* **575** (1), 354 (2002). DOI:10.1086/341219
35. N. Grosso, K. Hamaguchi, D. A. Principe, and J. H. Kastner, *Astron. and Astrophys.* **638**, id. L4 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/202038185
36. R. A. Gutermuth, T. L. Bourke, L. E. Allen, et al., *Astrophys. J.* **673** (2), L151 (2008). DOI:10.1086/528710
37. K. Hachisuka, A. Brunthaler, K. M. Menten, et al., *Astrophys. J.* **645** (1), 337 (2006). DOI:10.1086/502962
38. M. M. Hanson, *Astrophys. J.* **597** (2), 957 (2003). DOI:10.1086/378508
39. M. M. Hanson, I. D. Howarth, and P. S. Conti, *Astrophys. J.* **489** (2), 698 (1997). DOI:10.1086/304808
40. J. Hatchell, J. S. Richer, G. A. Fuller, et al., *Astron. and Astrophys.* **440** (1), 151 (2005). DOI:10.1051/0004-6361:20041836
41. L. A. Hillenbrand, P. Massey, S. E. Strom, and K. M. Merrill, *Astron. J.* **106**, 1906 (1993). DOI:10.1086/116774
42. A. Hojaev, G. I. Shanin, and Y. N. Artyomenko, in *Proc. 26th IAU Meeting on Astronomy for the Developing World, Prague, Czech Republic, 2006*, Ed. by J. B. Hearnshaw and P. Martinez (Cambridge University Press, Cambridge, 2007), pp. 177–182. DOI:10.1017/S1743921307006965
43. A. S. Hojaev, W. P. Chen, and H. T. Lee, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **22** (4-5), 799 (2003). DOI:10.1080/1055679031000124448
44. A. S. Hojaev and G. I. Shanin, in *Proc. 23rd IAU Meeting Joint Discussion on Enhancing Astronomical Research and Education in Developing Countries, Kyoto, Japan, 1997*, p. 3.
45. A. S. Hojaev and I. I. Zinchenko, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* **48** (9), 272 (2021). DOI:10.3103/S1068335621090098
46. M. Honma, T. Bushimata, Y. K. Choi, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **59**, 889 (2007). DOI:10.1093/pasj/59.5.889
47. R. M. Humphreys, *Astrophys. J. Suppl.* **38**, 309 (1978). DOI:10.1086/190559
48. K. G. Johnston, D. S. Shepherd, T. P. Robitaille, and K. Wood, *Astron. and Astrophys.* **551**, id. A43 (2013). DOI:10.1051/0004-6361/201219657
49. J. K. Jørgensen, D. Johnstone, H. Kirk, and P. C. Myers, *Astrophys. J.* **656** (1), 293 (2007). DOI:10.1086/510150
50. P. Kajdič and A. C. Raga, *Astrophys. J.* **670** (2), 1173 (2007). DOI:10.1086/522365
51. S. V. Kalenskii, V. G. Promyslov, V. I. Slysh, et al., *Astronomy Reports* **50** (4), 289 (2006). DOI:10.1134/S1063772906040032
52. P. D. Klaassen, T. K. Mroczkowski, C. Cicone, et al., *SPIE Conf. Proc.* **11445**, p. 114452F (2020).
53. J. Knödseder, *Astron. and Astrophys.* **360**, 539 (2000). DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/0007442
54. K. E. Kraemer, J. L. Hora, M. P. Egan, et al., *Astron. J.* **139** (6), 2319 (2010). DOI:10.1088/0004-6256/139/6/2319
55. M. R. Krumholz, *Physics Reports* **539**, 49 (2014). DOI:10.1016/j.physrep.2014.02.001
56. M. A. Kuhn, K. V. Getman, and E. D. Feigelson, *Astrophys. J.* **802** (1), article id. 60 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/802/1/60
57. M. A. Kuhn, K. V. Getman, E. D. Feigelson, et al., *Astrophys. J.* **725** (2), 2485 (2010). DOI:10.1088/0004-637X/725/2/2485
58. M. A. Kuhn, L. A. Hillenbrand, J. M. Carpenter, and A. R. Avelar Menendez, *Astrophys. J.* **899** (2), id. 128 (2020). DOI:10.3847/1538-4357/aba19a
59. M. A. Kuhn, L. A. Hillenbrand, A. Sills, et al., *Astrophys. J.* **870** (1), article id. 32 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/aaef8c
60. A. H. W. Küpper, T. Maschberger, P. Kroupa, and H. Baumgardt, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **417** (3), 2300 (2011). DOI:10.1111/j.1365-2966.2011.19412.x
61. C. J. Lada, *Progress of Theoretical Phys. Suppl.* **158**, 1 (2005). DOI:10.1143/PTPS.158.1

62. S.-P. Lai, J. M. Girart, and R. M. Crutcher, *Astrophys. J.* **598** (1), 392 (2003). DOI:10.1086/378769
63. S. Lata, W. P. Chen, J. C. Pandey, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **520** (1), 1092 (2023). DOI:10.1093/mnras/stad013
64. S. F. Likhachev, A. G. Rudnitskiy, A. S. Andrianov, et al., *Cosmic Research* **62** (1), 117 (2024). DOI:10.1134/S0010952523700764
65. R. B. Loren, *Astrophys. J.* **338**, 902 (1989). DOI:10.1086/167244
66. M. C. Lortet-Zuckermann, *Astron. and Astrophys.* **30**, 67 (1974).
67. R. Lucas and H. S. Liszt, *Astron. and Astrophys.* **358**, 1069 (2000).
68. K. L. Luhman and G. H. Rieke, *Astrophys. J.* **525** (1), 440 (1999). DOI:10.1086/307891
69. R. J. Maddalena and P. Thaddeus, *Astrophys. J.* **294**, 231 (1985). DOI:10.1086/163291
70. J. Maíz Apellániz, *Astron. and Astrophys.* **630**, A119 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201935885
71. J. Maíz Apellániz, A. Sota, J. I. Arias, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **224** (1), 4 (2016). DOI:10.3847/0067-0049/224/1/4
72. K. K. Mallick, M. S. N. Kumar, D. K. Ojha, et al., *Astrophys. J.* **779** (2), article id. 113 (2013). DOI:10.1088/0004-637X/779/2/113
73. E. L. Martín, *Ultracool Dwarfs: New Spectral Types L and T*, Ed. by H. R. A. Jones and I. A. Steele (Berlin Heidelberg: Springer, 2001), p. 153.
74. P. Massey and A. B. Thompson, *Astron. J.* **101**, 1408 (1991). DOI:10.1086/115774
75. A. J. Maury, P. André, A. Men'shchikov, et al., *Astron. and Astrophys.* **535**, id. A77 (2011). DOI:10.1051/0004-6361/201117132
76. K. M. Menten and K. Young, *Astrophys. J.* **450**, L67 (1995). DOI:10.1086/316776
77. F. Motte, S. Bontemps, P. Schilke, et al., *Astron. and Astrophys.* **476** (3), 1243 (2007). DOI:10.1051/0004-6361:20077843
78. I. D. Novikov, S. F. Likhachev, Y. A. Shchekinov, et al., *Physics Uspekhi* **64** (4), 386 (2021). DOI:10.3367/UFNe.2020.12.038898
79. T. Oka, J. A. Thorburn, B. J. McCall, et al., *Astrophys. J.* **582** (2), 823 (2003). DOI:10.1086/344726
80. G. N. Ortiz-León, S. A. Dzib, M. A. Kounkel, et al., *Astrophys. J.* **834** (2), article id. 143 (2017). DOI:10.3847/1538-4357/834/2/143
81. G. N. Ortiz-León, L. Loinard, S. A. Dzib, et al., *Astrophys. J.* **865** (1), article id. 73 (2018). DOI:10.3847/1538-4357/aada49
82. R. J. Parker and C. Alves de Oliveira, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **525** (2), 1677 (2023). DOI:10.1093/mnras/stad2378
83. Y. Pavlyuchenkov, T. Henning, and D. Wiebe, *Astrophys. J.* **669** (2), L101 (2007). DOI:10.1086/523941
84. S. Pearson, A. Scholz, P. S. Teixeira, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **507** (3), 4074 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab2394
85. L. Perotto, N. Ponthieu, J. F. Macías-Pérez, et al., *Astron. and Astrophys.* **637**, id. A71 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/201936220
86. L. Pirogov, I. Zinchenko, P. Caselli, and L. E. B. Johansson, *Astron. and Astrophys.* **461** (2), 523 (2007). DOI:10.1051/0004-6361:20054777
87. L. Pirogov, I. Zinchenko, A. Lapinov, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **109**, 333 (1995).
88. M. S. Povich, E. Churchwell, J. H. Bieging, et al., *Astrophys. J.* **696** (2), 1278 (2009). DOI:10.1088/0004-637X/696/2/1278
89. B. L. Rachford, T. P. Snow, J. Tumlinson, et al., *Astrophys. J.* **577** (1), 221 (2002). DOI:10.1086/342146
90. G. Rate, P. A. Crowther, and R. J. Parker, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **495** (1), 1209 (2020). DOI:10.1093/mnras/staa1290
91. A. W. Raymond, D. Palumbo, S. N. Paine, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **253** (1), article id. 5 (2021). DOI:10.3847/1538-3881/abc3c3
92. V. C. Reddish, L. C. Lawrence, and N. M. Pratt, *Publications of the Royal Observatory of Edinburgh* **5** (8), 111 (1966).
93. B. C. Reed, *Astron. J.* **125** (5), 2531 (2003). DOI:10.1086/374771
94. M. J. Reid, K. M. Menten, X. W. Zheng, et al., *Astrophys. J.* **700** (1), 137 (2009). DOI:10.1088/0004-637X/700/1/137
95. B. Reipurth, *Astron. and Astrophys.* **117**, 183 (1983).
96. L. Ricci, M. Robberto, and D. R. Soderblom, *Astron. J.* **136** (5), 2136 (2008). DOI:10.1088/0004-6256/136/5/2136
97. S. A. Rodney and B. Reipurth, *Handbook of Star Forming Regions, Vol. II*, Ed. by B. Reipurth (ASP Conference Series, 2008), p. 683. DOI:10.48550/arXiv.0808.3161
98. L. F. Rodríguez, S. A. Rodney, and B. Reipurth, *Astron. J.* **140** (4), 968 (2010). DOI:10.1088/0004-6256/140/4/968
99. A. L. Rosen, P. S. Li, Q. Zhang, and B. Burkhart, *Astrophys. J.* **887** (2), article id. 108 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab54c6
100. G. M. Rudnitskiy, *Trudy Gosudarstvennogo Astronomicheskogo Instituta im. Sternberga* **64** 2, 57 (1995).
101. D. Rumble, J. Hatchell, K. Pattle, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **460** (4), 4150 (2016). DOI:10.1093/mnras/stw1100
102. E. J. Safron, W. J. Fischer, S. T. Megeath, et al., *Astrophys. J.* **800** (1), article id. L5 (2015). DOI:10.1088/2041-8205/800/1/L5
103. H. Sana, E. Gosset, and C. J. Evans, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **400** (3), 1479 (2009). DOI:10.1111/j.1365-2966.2009.15545.x

104. A. Sanna, M. J. Reid, C. Carrasco-González, et al., *Astrophys. J.* **745** (2), article id. 191 (2012). DOI:10.1088/0004-637X/745/2/191
105. N. Schneider, S. Bontemps, R. Simon, et al., *Astron. and Astrophys.* **458** (3), 855 (2006). DOI:10.1051/0004-6361:20065088
106. N. Schneider and K. Brooks, *Publ. Astron. Soc. Australia* **21** (3), 290 (2004). DOI:10.1071/AS04012
107. N. Schneider, R. Simon, S. Bontemps, et al., *Astron. and Astrophys.* **474** (3), 873 (2007). DOI:10.1051/0004-6361:20077540
108. A. Scholz, R. Jayawardhana, and K. Wood, *Astrophys. J.* **645** (2), 1498 (2006). DOI:10.1086/504464
109. A. Scholz, K. Muzic, R. Jayawardhana, et al., *Astron. J.* **165** (5), id. 196 (2023). DOI:10.3847/1538-3881/acc65d
110. N. S. Schulz, *From Dust To Stars Studies of the Formation and Early Evolution of Stars* (Praxis Publishing, Chichester, 2005). DOI:10.1007/b138917
111. D. Semenov, D. Wiebe, and T. Henning, *Astrophys. J.* **647** (1), L57 (2006). DOI:10.1086/507096
112. H. M. Shi and J. Y. Hu, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **136**, 313 (1999). DOI:10.1051/aas:1999217
113. T. Shimoikura, K. Dobashi, F. Nakamura, et al., *Astrophys. J.* **806** (2), article id. 201 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/806/2/201
114. R. Y. Shuping, W. D. Vacca, M. Kassis, and K. C. Yu, *Astron. J.* **144** (4), article id. 116 (2012). DOI:10.1088/0004-6256/144/4/116
115. A. M. Sobolev, D. M. Cragg, S. P. Ellingsen, et al., *Proc. IAU Symp. No. 242*, Ed. by J. M. Chapman and W. A. Baan (Cambridge University Press, Cambridge, 2007), pp. 81–88. DOI:10.1017/S1743921307012616
116. C. Soubiran, T. Cantat-Gaudin, M. Romero-Gómez, et al., *Astron. and Astrophys.* **619**, id. A155 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201834020
117. G. J. Stacey, N. Battaglia, S. C. Chapman, et al., *SPIE Conf. Proc.* **12182**, id. 1218210 (2022).
118. V. A. Stolyarov, Y. Y. Balega, M. G. Mingaliev, et al., *Astrophysical Bulletin* **79** (2), 321 (2024). DOI:10.1134/S1990341324600467
119. R. C. Stone, *Astron. J.* **96**, 1389 (1988). DOI:10.1086/114888
120. V. Straizys, K. Černis, and S. Bartašiūtė, *Baltic Astronomy* **5**, 125 (1996). DOI:10.1515/astro-1996-0106
121. L. K. Townsley, P. S. Broos, G. P. Garmire, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **213** (1), article id. 1 (2014). DOI:10.1088/0067-0049/213/1/1
122. D. G. Turner, *Astron. and Astrophys.* **167**, 157 (1986).
123. J. P. Vallee, *Astron. and Astrophys.* **178**, 237 (1987).
124. F. F. S. van der Tak, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A* **364** (1848), 3101 (2006). DOI:10.1098/rsta.2006.1879
125. J. Walawender, J. Bally, J. D. Francesco, et al., *Handbook of Star Forming Regions, Vol. I, The Northern Sky*, Ed. by B. Reipurth (ASP Conference Series, 2008), p. 346.
126. J. W. Waters, R. K. Kakar, T. B. H. Kuiper, et al., *Astrophys. J.* **235**, 57 (1980). DOI:10.1086/157609
127. B. A. Wilking and C. J. Lada, *Astrophys. J.* **274**, 698 (1983). DOI:10.1086/161482
128. G. W. Wilson, S. Abi-Saad, P. Ade, et al., *SPIE Conf. Proc.* **11453**, id. 1145302 (2020).
129. T. L. Wilson and S. Guilloteau, *Millimeter Astronomy* (Springer, Berlin, 2018). DOI:10.1007/978-3-662-57546-8
130. S.-W. Wu, A. Bik, J. M. Bestenlehner, et al., *Astron. and Astrophys.* **589**, id. A16 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201527823
131. S. W. Wu, A. Bik, T. Henning, et al., *Astron. and Astrophys.* **568**, id. L13 (2014). DOI:10.1051/0004-6361/201424154
132. Y. Xu, M. J. Reid, X. W. Zheng, and K. M. Menten, *Science* **311** (5757), 54 (2006). DOI:10.1126/science.1120914
133. C. H. Young, J. K. Jørgensen, Y. L. Shirley, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **154** (1), 396 (2004). DOI:10.1086/422818
134. B. Zhang, L. Moscadelli, M. Sato, et al., *Astrophys. J.* **781** (2), article id. 89 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/781/2/89
135. S. Zhang, J. Yang, Y. Xu, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **248** (1), id. 15 (2020). DOI:10.3847/1538-4365/ab879a
136. L. Zhu, Y.-F. Wu, and Y. Wei, *Chinese J. Astron. and Astrophys.* **6** (1), 61 (2006). DOI:10.1088/1009-9271/6/1/007
137. I. Zinchenko, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, et al., *Astrophys. J.* **755**, article id. 177 (2012). DOI:10.1088/0004-637X/755/2/177
138. I. Zinchenko, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, et al., *Astrophys. J.* **810**, article id. 10 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/810/1/10
139. I. I. Zinchenko, *Radiophysics and Quantum Electronics* **46** (8), 577 (2003). DOI:10.1023/B:RAQE.0000024989.12653.a0
140. I. I. Zinchenko, A. V. Lapinov, V. F. Vdovin, et al., *Applied Sciences* **13** (21) id. 11706 (2023). DOI:10.3390/app132111706
141. I. I. Zinchenko, S. Y. Liu, D. K. Ojha, et al., *arXiv e-prints astro-ph:2408.03133* (2024). DOI:10.48550/arXiv.2408.03133

Possibilities for Studying Star-Formation Processes at IRAO “Suffa”: Objects and Tasks**A. S. Hojaev¹ and I. I. Zinchenko²**¹Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbek Academy of Sciences, Tashkent, 100052 Uzbekistan²Federal research center A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

We describe the general remaining unclear issues of the star-formation process that could be studied using the millimeter radio telescope on the Suffa plateau (Uzbekistan). A description of possible objects of study is given. The possibilities of solving scientific problems in studying these objects using various instruments are assessed: the 70-m RT-70 radio telescope, a smaller-diameter antenna (15–20 m), and an antenna array consisting of small (3–8 m) antennas.

Keywords: *stars: formation—ISM: clouds—radio lines: ISM—telescopes*