

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## Актуальные задачи и перспективы миллиметровой и субмиллиметровой астрономии\*

И.И. Зинченко

*Представлен обзор основных направлений исследований, важнейших результатов и актуальных научных задач миллиметровой и субмиллиметровой астрономии. Обсуждаются перспективы развития этого направления в мире и в Российской Федерации.*

**Ключевые слова:** миллиметровая и субмиллиметровая астрономия, радиотелескопы, радиоинтерферометры, прозрачность атмосферы

PACS numbers: 95.55.Jz, 98.58.–w, 98.70.Vc

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.03.039996>

## Содержание

1. Введение (290).
  2. Основные результаты и актуальные задачи миллиметровой и субмиллиметровой астрономии (291).
    - 2.1. Микроволновое "реликтовое" фоновое излучение. 2.2. Галактики и скопления галактик. 2.3. Межзвёздная среда, образование звёзд и планет. 2.4. Солнечная система.
  3. Перспективы миллиметровой и субмиллиметровой астрономии (295).
  4. Заключение (299).
- Список литературы (299).

## 1. Введение

Активное развитие миллиметровой астрономии началось в 1960-х годах, когда были построены первые крупные антенны этого диапазона (такие, как 11-метровый радиотелескоп НРАО США, РТ-22 ПРАО, РТ-22 КраО и др.) и были созданы достаточно чувствительные приёмники. Обзор начального этапа развития этого направления дан, например, в работе [1]. В последующие годы антенная и приёмная техника миллиметрового диапазона быстро развивалась. Шумовая температура гетеродинных приёмников приблизилась к так называемому квантовому пределу, наличие которого вытекает из соотношения неопределённостей энергия–время. Были построены новые радиотелескопы этого диапазона, как одиночные, так и антенные решётки. При этом происходило постепенное продвижение в область всё более коротких длин волн — в субмиллиметровый диапазон,



**Рис. 1.** Сотрудники НИРФИ проводят радиоастрономические наблюдения в диапазоне длин волн  $\sim 1$  мм на Тянь-Шане (на обсерватории ГАИШ, 1975 г.).

который граничит с инфракрасным и, по сути, с ним перекрывается, поскольку часто называется дальним инфракрасным. Используется и такая терминология, как субтерагерцовый и терагерцовый диапазоны. Дальнейший прогресс миллиметровой и субмиллиметровой астрономии описан, например, в обзорах [2, 3].

В СССР первые наблюдения астрономических объектов и исследования прозрачности атмосферы в субмиллиметровом диапазоне длин волн проводились при помощи небольших антенн в горах Памира и Тянь-Шаня сотрудниками Научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ) под руководством А.Г. Кислякова (рис. 1) и Института космических исследований (ИКИ) АН СССР (Г.Б. Шоломицкий и др.).

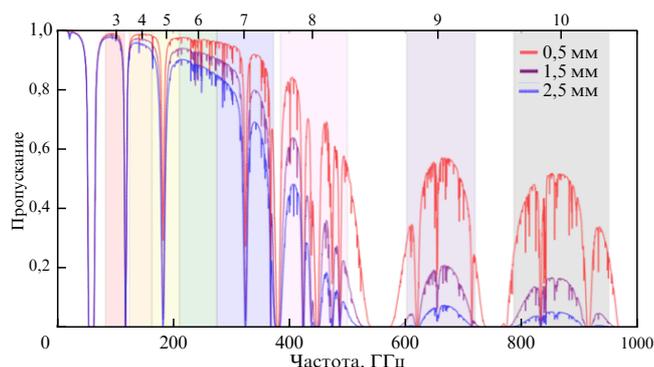
Размещение телескопов субмиллиметрового диапазона длин волн в горах обусловлено сильным поглоще-

И.И. Зинченко

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,  
ул. Ульянова 46, 603951 Нижний Новгород, Российская Федерация  
E-mail: zin@ipfran.ru

Статья поступила 26 июля 2025 г.

\* Статья написана на основе доклада, представленного на Научной сессии Отделения физических наук Российской академии наук, 19 марта 2025 г. (см. УФН 196 (3) 238 (2026))



**Рис. 2.** Прозрачность атмосферы в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн в пустыне Атакама в Чили на высоте 5000 м над уровнем моря в зависимости от количества осаждаемого водяного пара в атмосфере. Показаны рабочие диапазоны ALMA. ©ALMA (ESO/NAOJ/NRAO).

нием излучения этого диапазона атмосферными газами, прежде всего парами воды и кислородом. На рисунке 2 приведён график прозрачности атмосферы на площадке размещения Большой миллиметровой/субмиллиметровой решётки в Атакаме ALMA (The Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) в высокогорной пустыне (высота 5000 м) Атакама в Чили в зависимости от количества осаждаемого водяного пара в атмосфере. Эта величина определяется как интеграл по высоте от объёмной плотности водяного пара, нормированный на удельный вес воды, что соответствует толщине слоя воды, который получится, если весь водяной пар в атмосфере над данным местом сконденсировать на поверхности. Она обычно измеряется в миллиметрах.

Наблюдения с поверхности Земли возможны только в так называемых окнах прозрачности атмосферы — интервалах частоты с приемлемой прозрачностью между сильными линиями поглощения водяного пара и кислорода. На частотах  $\geq 1,5$  ТГц таких окон в субмиллиметровом диапазоне практически нет. В связи с этим проводились измерения на аэростатах, работала самолётная обсерватория SOFIA (Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy; её работа прекращена в 2022 г.) [4] и были созданы космические обсерватории, самая большая и эффективная из которых — 3,5-м телескоп Европейского космического агентства Herschel [5], который успешно работал в 2009–2013 гг. В 2030-х гг. планируется запуск российской космической обсерватории "Миллиметрон" с антенной диаметром 10 м, которая будет значительно превосходить по своим возможностям Herschel [6, 7].

Миллиметровая и субмиллиметровая астрономия играет ключевую роль в нескольких направлениях исследований. Во-первых, это изучение того, что можно назвать "холодной" Вселенной. В основном это плотные межзвёздные газопылевые облака, как в нашей Галактике, так и за её пределами. В этих облаках происходит процесс звездообразования, многие аспекты которого до сих пор не вполне понятны. Температура межзвёздных облаков составляет от нескольких до десятков кельвинов. Пик их излучения при такой температуре лежит в субмиллиметровом диапазоне. Этот диапазон также очень богат спектральными линиями, отвечающими в основном переходам между вращательными уровнями молекул с относительно низкой энергией возбуждения. К настоящему времени в межзвёздных и околозвёздных

облаках обнаружено около 330 различных молекул, не считая изотопологов.<sup>1</sup> Наблюдения линий этих молекул позволяют получать уникальную информацию о физических условиях в межзвёздных облаках, их строении и кинематике, а также о химическом составе.

К этой же категории можно отнести и исследования микроволнового "реликтового" фона, температура которого составляет приблизительно 2,73 К. Исследуются спектр, анизотропия и поляризация фона. Возникающие здесь задачи рассмотрены ниже.

Другой класс задач, где миллиметровая и субмиллиметровая астрономия играет ключевую роль, — это исследования далёких астрономических объектов с очень высоким угловым разрешением методами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами. Очевидно, что на более коротких волнах можно получить более высокое разрешение при той же длине базы. Кроме того, важно то, что рассеяние в межзвёздной среде в данном диапазоне падает с укорочением длины волны. Это позволило получить изображения сверхмассивных чёрных дыр в галактике M87 и в центре нашей Галактики [8–10] на длине волны 1,3 мм с помощью так называемого Телескопа Горизонта Событий (ТГС), который объединяет крупнейшие телескопы, работающие в этом диапазоне (около 10 телескопов).

Впечатляющие достижения миллиметровой и субмиллиметровой астрономии ставят новые вопросы и стимулируют дальнейшее развитие инструментальной базы этого диапазона. Ниже рассмотрены актуальные задачи этого направления исследований и перспективы его развития.

## 2. Основные результаты и актуальные задачи миллиметровой и субмиллиметровой астрономии

### 2.1. Микроволновое "реликтовое" фоновое излучение

К настоящему времени установлено, что спектр микроволнового "реликтового" фона очень близок к чернотельному. Каких-либо отклонений пока не обнаружено. Такие отклонения могут быть вызваны процессами энерговыделения в ранней Вселенной [11]. Характер искажений спектра зависит от того, в какую эпоху происходит выделение энергии (например, [7]). При красных смещениях  $5 \times 10^4 < z < 2 \times 10^6$  возникают так называемые  $\mu$ -искажения, которые соответствуют ненулевому химическому потенциалу  $\mu$ . При выделении энергии в более поздние эпохи, до  $z \sim 10^3$ , искажения спектра соответствуют эффекту Сюняева–Зельдовича и называются  $\nu$ -искажениями, в соответствии с общепринятым обозначением параметра комптонизации фотонов в электронной плазме. Подобные искажения могут возникать и в более поздние эпохи в процессе формирования крупномасштабной структуры. Относительная амплитуда этих искажений очень мала,  $\lesssim 10^{-4}$ .

На спектр фона могут также влиять пыль и молекулы в ранней Вселенной [12–15]. Простые молекулы, такие как  $\text{H}_2$ , HD,  $\text{HeH}^+$ , LiH, могли образоваться в заметных количествах вскоре после эпохи рекомбинации [16, 17]. Особенности в спектре фона, обусловленные этими молекулами, могут появиться вследствие резонансного

<sup>1</sup> <https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules>.

рассеяния фотонов фона на протообъектах, движущихся со значительными скоростями относительно микроволнового фона [16, 18]. Возможен также нагрев газа в коллапсирующих первичных возмущениях плотности. Таким образом, наблюдения таких искажений спектра могут быть средством исследования образования первичных структур в так называемые "Тёмные века" Вселенной — период между эпохой рекомбинации и появлением первых звёзд. Было несколько безуспешных попыток поиска таких спектральных особенностей, в том числе на миллиметровых и субмиллиметровых волнах [19, 20]. В работе [21] предпринята попытка поиска линии  $J = 1-0$   $\text{HeH}^+$  в спектре далёкого квазара ( $z = 6,42$ ). Достоверно зарегистрировать линию не удалось.

Пыль могла появиться после образования первых звёзд. Соответственно, исследование искажений спектра фона, обусловленных пылью, важно для изучения истории звездообразования в ранней Вселенной. Результаты JWST показывают, что она вызывает много вопросов. Содержание пыли в галактиках на больших красных смещениях обсуждается, например, в работе [22].

Одна из важнейших задач в исследованиях Вселенной — поиск проявлений первичных гравитационных волн, которые возникают в инфляционных моделях в первые мгновения её жизни. Единственным наблюдательным проявлением этих волн, как сейчас представляется, является В-мода поляризации микроволнового фона [23]. Помимо первичных гравитационных волн, В-мода может возникать вследствие гравитационного линзирования и рассеяния на пыли в Галактике. Эта компонента измерена в ряде экспериментов [24]. Однако задача поиска излучения с такой поляризацией, обусловленной первичными гравитационными волнами, остаётся одной из важнейших. Несколько лет назад сообщалось об её обнаружении [25], но, как показали данные аппарата Planck, этот сигнал обусловлен пылью в нашей Галактике.

## 2.2. Галактики и скопления галактик

**2.2.1. Активные ядра галактик и сверхмассивные чёрные дыры.** Одним из самых ярких достижений миллиметровой астрономии стали упомянутые выше наблюдения сверхмассивных чёрных дыр (СМЧД) в галактике M87 и в центре нашей Галактики [8–10] на длине волны 1,3 мм с помощью упомянутого выше Телескопа Горизонта Событий (ТГС). Дальнейшие исследования этих объектов требуют значительного повышения углового разрешения, что может быть достигнуто на наземно-космических базах в проекте "Миллиметрон". Детальное обсуждение научных задач таких исследований представлено в работе [7]. Повышение углового разрешения позволит изучать и некоторые другие СМЧД.

Помимо СМЧД, наблюдения с высоким разрешением позволяют изучать активные ядра галактик (АЯГ) и релятивистские джеты, возникающие в этих объектах. Важным преимуществом миллиметрового диапазона является отсутствие синхротронного поглощения, что позволяет исследовать центральные области АЯГ. В частности, предлагается использовать ТГС следующего поколения (ngEHT) для изучения центральных областей блазаров [26], которые, по-видимому, являются источниками нейтрино высоких энергий [27, 28].

Значительный потенциал имеют наблюдения (суб)миллиметровых мегамазеров  $\text{H}_2\text{O}$  в далёких галактиках [29]. Такие наблюдения позволяют с высокой точ-

ностью оценивать массы центральных объектов и изучать, например, рост масс СМЧД в галактиках.

В исследованиях АЯГ большое значение имеет изучение их переменности. Многочастотный мониторинг сотен АЯГ, в частности блазаров, уже долгое время выполняется на РАТАН-600 (например, [30–32]). Он, однако, не включает в себя миллиметровый диапазон. Мониторинг в диапазоне длин волн 8 мм ведётся на РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории (например, [33]).

Имеются и примеры мониторинга АЯГ на коротких миллиметровых волнах. Например, на 30-м радиотелескопе IRAM реализуется проект POLAMI (Polarimetric Monitoring of AGN at Millimetre Wavelengths), в рамках которого ведётся мониторинг на длинах волн 3 мм и 1,3 мм всех четырёх параметров Стокса у выборки из 37 АЯГ [34, 35].

**2.2.2. Субмиллиметровые и яркие ИК-галактики.** В ходе обзоров неба на субмиллиметровых волнах было выявлено значительное число очень ярких именно в субмиллиметровом диапазоне длин волн галактик [36]. Их принято называть субмиллиметровыми галактиками. Субмиллиметровое излучение генерируется нагретой пылью, а высокая светимость на этих волнах может быть обусловлена вспышкой звездообразования, которая может быть вызвана слиянием галактик. Однако далеко не всегда, по-видимому, высокие темпы звездообразования обусловлены этим фактором (например, [37]). Большая часть субмиллиметровых галактик находится на красных смещениях  $z \sim 2-4$  и пик их излучения, расположенный в собственной системе отсчёта на волнах  $\sim 100$  мкм, смещается соответственно на более длинные волны. Субмиллиметровые галактики вместе с яркими ИК-галактиками образуют класс запылённых звездообразующих галактик (DSFG — Dusty StarForming Galaxies; [38]). Дальнейшее изучение данных объектов представляет собой важную и актуальную задачу субмиллиметровой астрономии.

**2.2.3. Эффект Сюняева–Зельдовича.** Интересной и важной областью использования миллиметровых и субмиллиметровых волн в астрофизике является эффект Сюняева–Зельдовича (ЭСЗ) — слабое искажение спектра микроволнового реликтового фона за счёт рассеяния фотонов фонового излучения на высокоэнергичных электронах [39]. Большое количество таких электронов присутствует в центрах скоплений галактик. Тепловой ЭСЗ проявляется как уменьшение интенсивности реликтового излучения на частотах ниже 218 ГГц и возрастание на более высоких частотах. Величина этого эффекта не зависит от красного смещения, что позволяет детектировать очень далёкие скопления галактик. Например, на 6-м радиотелескопе АСТ (Atacama Cosmology Telescope) в Чили в результате наблюдений ЭСЗ на длинах волн 3 и 2 мм был составлен каталог из более чем 4000 скоплений галактик [40]. На 10-м телескопе SPT (South Pole Telescope) на южном полюсе выполнен глубокий обзор площадки 100 кв. градусов в диапазонах длин волн 3, 2 и 1,3 мм, в результате которого идентифицировано около 500 кандидатов в скопления галактик [41]. Представляются актуальными дальнейшие исследования этого эффекта в том числе на субмиллиметровых волнах. Такие наблюдения должны, в частности, позволить определить температуру релятивистских электронов [42],

а электроны в типичных скоплениях галактик должны быть релятивистскими.

Помимо теплового, возможен и кинематический ЭСЗ, связанный с движением объектов относительно реликтового фона. Такой эффект был впервые зарегистрирован в работе [43] и наблюдался в некоторых других работах. Недавно он детально исследовался при суммировании данных наблюдений большого числа галактик [44, 45]. Эти результаты имеют большое значение для понимания процессов формирования галактик. Ожидается значительный прогресс в исследованиях данного эффекта.

### 2.3. Межзвёздная среда, образование звёзд и планет

**2.3.1. Межзвёздная среда и звездообразование.** Межзвёздная среда многокомпонентна. Наблюдения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах позволяют изучать сравнительно плотные и холодные области, в которых происходят процессы звездообразования. Исследования общих характеристик таких областей основаны на обзорах в континууме и в спектральных линиях молекул на волнах от миллиметрового до инфракрасного диапазонов. К настоящему времени выполнено довольно много таких обзоров. Хорошим примером является обзор плоскости Галактики в линии CO  $J = 1-0$  [46], который послужил основой для многих дальнейших исследований. Такой обзор даёт общее представление о распределении и кинематике межзвёздного вещества. Позднее при помощи наземных и космических инструментов были выполнены обзоры значительных участков плоскости Галактики с существенно более высоким разрешением в континууме и в линиях некоторых молекул. Среди них можно отметить наземные обзоры в континууме на волнах  $\sim 1$  мм ATLASGAL (The APEX Telescope Large Area Survey of the GALaxy at 870 мкм) [47, 48] и BOLOCAM [49], а также обзор в линии  $^{13}\text{CO } J = 1-0$  GRS (The Boston University-Five College Radio Astronomy Observatory Galactic Ring Survey) [50]. Очень много полезной информации дали космические аппараты, работавшие на волнах от дальнего ИК до ближнего ИК-диапазонов (например, *Spitzer* Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire — GLIMPSE [51] и MIPS Inner Galactic Plane Survey — MIPS GAL [52], *Herschel* [5] infrared Galactic Plane Survey — Hi-GAL [53], Wide field Infrared Survey Explorer — WISE [54]). Результаты этих обзоров сейчас активно используются при изучении областей звездообразования.

Другой вид подобных работ — это обзоры отобранных по тем или иным критериям выборок объектов, которые могут представлять собой различные типы областей звездообразования или могут быть индикаторами таких областей. Обзоры проводятся в континууме на миллиметровых и субмиллиметровых волнах, а также в линиях распространенных молекул, таких как CO, CS, NH<sub>3</sub>, HCN, HCO<sup>+</sup>, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> и некоторых других. Как яркий пример таких исследований, можно отметить серию работ Филипа Майерса с соавторами по изучению плотных ядер в тёмных облаках, выполненных уже довольно давно [55–70]. В результате этих работ были определены основные физические характеристики таких ядер, исследован химический состав, изучены корреляции между параметрами.

В этих тёмных облаках происходит образование звёзд малой массы, порядка массы Солнца и меньше. Аналогичные работы проводились и проводятся в направлении

областей образования массивных звёзд (такowymi считаются звёзды с массами  $M \gtrsim 8 M_{\odot}$ ). Процесс образования массивных звёзд представляется более сложным, чем образование звёзд малой массы и в нём пока много неясных моментов (например, [71, 72]), связанных с тем, что ядерные реакции в массивных протозвёздах начинаются много раньше, чем они набирают окончательную массу. Радиационное давление может остановить дальнейший приток вещества. Не вполне понятно также, как объяснить тот факт, что массивные ядра не распадаются на более мелкие фрагменты. Исследования областей образования массивных звёзд затрудняются тем обстоятельством, что они расположены гораздо дальше от нас, чем тёмные облака, в которых формируются звёзды небольшой массы. Ближайшая такая область находится на расстоянии  $\sim 500$  пк, а типичные расстояния составляют несколько килопарсек. Для их детального изучения требуются интерферометры. В настоящее время отсутствует общепринятая модель образования массивных звёзд. Существует несколько основных возможных сценариев, применимость которых сейчас активно изучается. Таким образом, изучение процессов образования массивных звёзд остаётся одной из наиболее актуальных задач астрофизики и решаться она должна в основном методами миллиметровой и субмиллиметровой астрономии. Обзор наблюдательных исследований таких областей представлен в работе [73].

Среди многих работ по этой теме отметим серию наших исследований, начатых в 1980-х гг. на РТ-22 КРАО [74–76] и продолженных затем на различных инструментах мира [77–88]. В этих работах были выполнены обзоры нескольких десятков областей образования массивных звёзд в линиях таких молекул, как HCN, HCO<sup>+</sup>, CS, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, HNCO, C<sup>18</sup>O, SO и др. Это позволило получить статистические распределения основных физических параметров для этих объектов, в частности, размеров, массы, плотности, дисперсии скоростей. По наблюдениям NH<sub>3</sub> и CH<sub>3</sub>CSH были сделаны оценки кинетической температуры газа [81, 89, 90].

В ходе исследований областей звездообразования выяснилось, что практически все межзвёздные облака имеют волокнистую структуру. Более того, оказалось, что именно волокна являются основными очагами звездообразования [91]. Характеристики этих волокон сейчас активно изучаются путём наблюдений излучения пыли и молекул на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Строятся теоретические модели формирования и эволюции таких структур. Наблюдения показывают, что в ряде случаев процесс звездообразования идёт быстрее на концах волокон [92–94], что может быть связано с ускорением вещества в этих областях [95]. Во многих случаях наиболее активное звездообразование наблюдается в местах пересечения волокон. Имеются признаки того, что это процесс может быть инициирован столкновением волокон (например, [96–98]). Многочисленные исследования показывают, что волокна возникают естественным образом в результате сверхзвуковой турбулентности и воздействия ударных волн (например, [91, 99]). Они могут также возникать в результате фрагментации плоских структур (например, оболочек вокруг зон Н II, старых остатков сверхновых и т.п.). Исследования межзвёздных волокон будут актуальны ещё достаточно долго.

В конечном счёте процесс звездообразования происходит в так называемых плотных ядрах, которые могут

образовываться, например, в результате фрагментации межзвёздных волокон. В настоящее время сложилась определенная классификация таких ядер, основанная на данных о присутствии в них (прото)звёздных объектов и на их спектральных характеристиках. Наиболее детально она разработана для ядер в областях образования звёзд малой массы. Их принято делить на несколько основных категорий: беззвёздные, дозвёздные, протозвёздные [100]. Дозвёздные в отличие от беззвёздных являются гравитационно связанными и могут в дальнейшем сформировать протозвезду. В протозвёздных такая протозвезда уже имеется. Для протозвёздных ядер существует устоявшееся деление на 4 класса — от Class 0 до Class III, — основанное на их спектральных характеристиках и соответствующее, очевидно, эволюционной последовательности [101–103].

Много усилий было направлено на поиск массивных дозвёздных ядер (с массой  $\sim 30 M_{\odot}$  в радиусе 0,03 пк), которые могли бы сформировать массивную протозвезду. Обнаружение таких ядер могло бы послужить аргументом в поддержку модели монолитного коллапса при образовании массивных звёзд. К настоящему времени удалось обнаружить всего лишь несколько кандидатов в такие ядра [104]. Отсутствие заметного количества массивных дозвёздных ядер может объясняться их коротким временем жизни, порядка времени свободного падения.

В настоящее время общепризнано, что образование звёзд с массой порядка солнечной происходит путём дисковой аккреции вещества, сопровождаемой биполярными истечениями. Имеются наблюдения большого числа дисков в областях образования звёзд малой массы. Имеются также наблюдения дисков или тороидальных структур вокруг нескольких десятков массивных протозвёзд [105]. Высокоскоростные биполярные истечения наблюдаются повсеместно. Детальный обзор их характеристик и моделей представлен в работе [106]. Особый интерес представляют наблюдения дисков и истечений в областях образования массивных звёзд, поскольку они позволяют лучше понять механизм формирования таких звёзд.

Недавно были зарегистрированы события, которые свидетельствуют в пользу дисковой аккреции как механизма образования звёзд с массой по крайней мере до  $\sim 20 M_{\odot}$ . Первыми были вспышки светимости объектов NGC6334I-MM1 [107] и S255 NIRS3 [108, 109]. Они сопровождались вспышками мазерного излучения [110–113]. Эти события были интерпретированы, как результат эпизодической аккреции вещества на центральную массивную протозвезду, подобную той, что наблюдается при образовании звёзд малой массы, но гораздо большего масштаба. Это примерно соответствует некоторым теоретическим моделям фрагментированных дисков вокруг массивных протозвёзд [114]. К настоящему времени такие явления зарегистрированы в нескольких объектах [115] и очевидно, что исследования такой эпизодической аккреции в массивных протозвёздах очень актуальны и будут активно продолжаться.

Одной из важнейших задач в настоящее время является изучение звездообразования в ранней Вселенной. Вопрос этот рассмотрен в обзоре [7].

**2.3.2. Межзвёздные молекулы.** Одним из важных и довольно неожиданных результатов радиоастрономических исследований межзвёздной среды явилось обнаружение

большого числа различных молекул. В основном эти молекулы открываются по наблюдениям их спектральных линий на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Как отмечено выше, к настоящему времени обнаружено более 300 различных молекул, не считая изотопологов. Среди них есть немало сложных органических молекул. Появлялись не подтвердившиеся сообщения об обнаружении простейшей аминокислоты — глицина. Эти открытия стимулировали разработку моделей химической эволюции межзвёздной среды. Дальнейшие исследования нацелены в значительной мере на поиск соединений, которые могут быть связаны с биологической эволюцией. Можно упомянуть проекты PRIMOS (PRebiotic Interstellar MOlecule Survey), выполняемый на радиотелескопе GBT, и SOLIS (Seeds Of Life In Space), реализуемый на интерферометре IRAM NOEMA. К этому направлению исследований примыкают и наблюдения молекул воды, особенно в протопланетных дисках. Наличие воды является необходимым условием для существования жизни в знакомых нам формах. Вопросы поиска и исследования сложных молекул и воды во Вселенной подробно обсуждаются в работах [7, 116].

Одним из важных направлений исследований является изучение фракционирования дейтерия в межзвёздных облаках. Этот эффект обусловлен экзотермичностью реакций замены протона дейтроном в молекулах, которые лежат в основе цепочек химических реакций, ведущих к образованию большинства других молекул (например, [117]). Он изучался, в основном, в тёмных холодных облаках, но в последнее время было найдено, что фракционирование дейтерия эффективно происходит и в тёплых облаках, где рождаются массивные звёзды. В частности, нами был выполнен обзор нескольких десятков областей образования массивных звезд в линиях ряда дейтерированных молекул в диапазоне длин волн 3–4 мм на 20-м радиотелескопе Обсерватории Онсала. Результаты наблюдений DCN, DNC, DCO<sup>+</sup>, N<sub>2</sub>D<sup>+</sup> и NH<sub>2</sub>D были опубликованы в работах [118, 119]. Дейтерированные молекулы зарегистрированы примерно в 1/3 наблюдавшихся объектов. Выявлены различия в зависимости относительного содержания таких молекул от температуры и дисперсии скоростей. Дальнейшие наблюдения на 30-м радиотелескопе IRAM позволили изучить пространственные вариации степени обогащения дейтерием для разных молекул, а также оценить физические характеристики источников [120, 121].

**2.3.3. Поиск вариаций фундаментальных физических констант по наблюдениям молекулярных облаков в нашей и других галактиках.** Вопрос о том, являются ли фундаментальные безразмерные физические константы действительно константами или они могут меняться в пространстве и во времени, требует изучения и такого рода исследованиям посвящено немало работ. Эти исследования основаны на измерениях относительных сдвигов спектральных линий атомов и молекул, частоты которых по разному зависят от этих констант (например, [122]; А.В. Лапинов и др. *Вестник РФФИ* 1(73) 111–118 (2012). Наиболее высокой точности измерений удаётся добиться в микроволновом диапазоне, в том числе на миллиметровых и субмиллиметровых волнах при исследованиях возможных пространственных вариаций фундаментальных констант в Галактике. Возможность таких вариаций появляется в моделях так называемых

хамелеонных скалярных полей (например, [123]), в которых предполагается, что потенциал и эффективная масса кванта скалярного поля модулируются локальной плотностью вещества. При этом такие фундаментальные безразмерные константы, как постоянная тонкой структуры,  $\alpha \approx 1/137$ , и отношение масс электрона и протона  $\mu = m_e/m_p$  становятся зависящими от локальной плотности. В теоретических моделях предсказывается, что относительные вариации  $\mu$  должны значительно превышать вариации  $\alpha$ , поэтому проводимые исследования нацелены именно на поиск вариаций отношения массы электрона к массе протона.

С этой целью проводились наблюдения и анализ данных наблюдений холодных молекулярных облаков в Галактике с малой дисперсией скоростей в линиях ряда молекул, прежде всего  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HC}_3\text{N}$  и  $\text{CH}_3\text{OH}$  [124–132]. Инверсионные переходы  $\text{NH}_3$  и вращательные переходы  $\text{HC}_3\text{N}$  имеют разную чувствительность к величине  $\mu$ . Также разную чувствительность имеют разные типы переходов метанола  $\text{CH}_3\text{OH}$ . По этим наблюдениям получен верхний предел вариаций  $|\Delta\mu|/\mu \lesssim 3 \times 10^{-8}$ , хотя в недавних работах [131, 132] найдены указания на то, что в молекулярных облаках центра Галактики это отношение понижено по сравнению с измерениями в лаборатории и близких молекулярных облаках на величину  $\sim (3-4) \times 10^{-7}$  ( $\sim 5\sigma$ ).

Эти исследования требуют знания частот переходов с очень высокой точностью. Для большинства молекул имеющаяся точность недостаточна. Требуются прецизионные лабораторные измерения этих частот. С этой целью в ИПФ РАН были созданы субдоплеровские спектрометры на основе измерений провала Лэмба [133, 134]. В целом, данное направление исследований имеет хорошие перспективы.

Стоит отметить, что прецизионные измерения частот разных переходов различных молекул важны также для исследования кинематики холодных облаков с малой дисперсией скоростей, поскольку разные переходы трассируют разные области в таком облаке.

**2.3.4. Протопланетные диски и экзопланеты.** В последние годы благодаря ALMA впервые были получены детальные изображения ряда протопланетных дисков (например, [135]), которые значительно расширяют возможности изучения процессов образования планет.

При помощи ALMA астрономы впервые уверенно зарегистрировали пылевой диск вокруг внесолнечной планеты [135]. Эти наблюдения проливают свет на механизмы формирования лун и планет в молодых звёздных системах. Эти исследования только начинаются и имеют хорошие перспективы на основе сочетания наблюдений в миллиметровом/субмиллиметровом и других диапазонах.

## 2.4. Солнечная система

ALMA позволяет получать изображения поверхности Солнца, в частности солнечных пятен, на миллиметровых волнах с рекордным угловым разрешением. Это даёт возможность детально исследовать структуру магнитного поля в активных областях. Важной задачей является исследование природы суб-терагерцовой компоненты вспыхивающего излучения [136].

Наблюдения спектральных линий молекул на миллиметровых и субмиллиметровых волнах позволяют изучать химический состав атмосфер планет и их спутни-

ков, а также состав газов, испаряющихся с поверхности комет, при их приближении к Солнцу. Наблюдения с высоким угловым разрешением позволяют изучать движения атмосферных масс, кинематику хвостов комет и пр. Задачи эти останутся актуальными ещё долгое время. Они включают в себя изучение изотопного состава воды и других соединений, определение отношения содержания дейтерия и водорода.

Особый интерес представляет поиск соединений, которые могут быть индикаторами биологической эволюции. В связи с этим можно отметить работу [137], в которой сообщалось об обнаружении фосфина на Венере по наблюдениям в миллиметровом диапазоне длин волн на ALMA и JMST, причём в таком количестве, которое нельзя объяснить другими источниками, кроме биологических. Работа эта подверглась серьёзной критике, так что её результаты пока рассматриваются, как неопределённые, но направление исследований очень интересно и, очевидно, будет развиваться.

## 3. Перспективы миллиметровой и субмиллиметровой астрономии

Достижения миллиметровой и субмиллиметровой астрономии, частично описанные выше, и наличие важных актуальных задач стимулируют дальнейшее развитие этой области. Поскольку атмосфера сильно ограничивает возможности наблюдений на этих длинах волн, реализуются космические проекты. Как отмечено выше, очень успешной была космическая обсерватория Европейского космического агентства Herschel, которая работала в точке Лагранжа L2 в 2009–2013 гг. [5]. В Астрокосмическом центре (АКЦ) ФИАН сейчас реализуется проект российской космической обсерватории "Миллиметрон" с охлаждаемой антенной диаметром 10 м [6, 7]. Планируется, что этот аппарат будет работать как в режиме одиночной антенны, которая будет значительно превосходить по своим возможностям Herschel, так и в режиме наземно-космического интерферометра. Запуск этой обсерватории планируется в 2030-х годах. В NASA также рассматривается проект космического субмиллиметрового ( $\sim 3-600$  мкм) телескопа с большим (9,1 или 5,9 м) охлаждаемым до  $\sim 4$  К зеркалом (Origins Space Telescope [138]), но режим РСДБ там не предусмотрен.

В АКЦ ФИАН рассматриваются также проекты суб-терагерцового космического интерферометра, состоящего из нескольких антенн, а также антенной решётки на поверхности Луны [139, 140].

Подобные космические проекты, безусловно, важны, поскольку позволяют решать задачи, которые не могут быть решены с помощью наземных инструментов. Однако стоимость этих проектов весьма велика, а время активного функционирования таких космических аппаратов довольно ограничено. В то же время многие актуальные задачи, перечисленные выше, вполне успешно могут решаться при помощи наземных средств. Наземные антенны нужны и для обеспечения работы наземно-космического интерферометра. В настоящее время на разных стадиях разработки и реализации находятся несколько проектов наземных миллиметровых и субмиллиметровых телескопов, как одиночных антенн, так и интерферометров.

Самым большим одиночным миллиметровым телескопом в настоящее время является Большой Миллимет-



**Рис. 3.** Большой Миллиметровый Телескоп (Large Millimeter Telescope Alfonso Serrano) диаметром 50 м в Мексике. Расположен на вершине Sierra Negra (высота 4600 м над уровнем моря). ©LMT.



**Рис. 4.** Большая миллиметровая/субмиллиметровая решётка в Атакаме ALMA (The Atacama Large Millimeter/submillimeter Array). ©ALMA (ESO/NAOJ/NRAO).

ровый Телескоп (Large Millimeter Telescope) диаметром 50 м в Мексике [141] (рис. 3). Там достигнута точность поверхности (среднеквадратичное отклонение) примерно 100 мкм, что несколько выше целевого значения 75 мкм. Тем не менее это обеспечивает приемлемый коэффициент использования поверхности (КИП)  $\sim 30\%$  на длине волны 1,3 мм, что позволяет эффективно использовать этот радиотелескоп в проекте Телескоп Горизонта Событий.

В настоящее время основным инструментом субмиллиметрового диапазона в мире является Большая миллиметровая/субмиллиметровая решётка в Атакаме ALMA (The Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), состоящая из 54-х 12-м и 12-ти 7-м антенн в высокогорной пустыне (высота 5000 м) Атакама в Чили (рис. 4). Максимальное расстояние между антеннами 16 км. Это международный проект, в котором участвует много стран и организаций.

Завершена модернизация миллиметрового интерферометра IRAM в Альпах, который теперь называется



**Рис. 5.** Миллиметровый интерферометр NOEMA (NORthern Extended Millimeter Array) Института миллиметровой астрономии (IRAM) в Альпах на высоте 2560 м. ©IRAM.

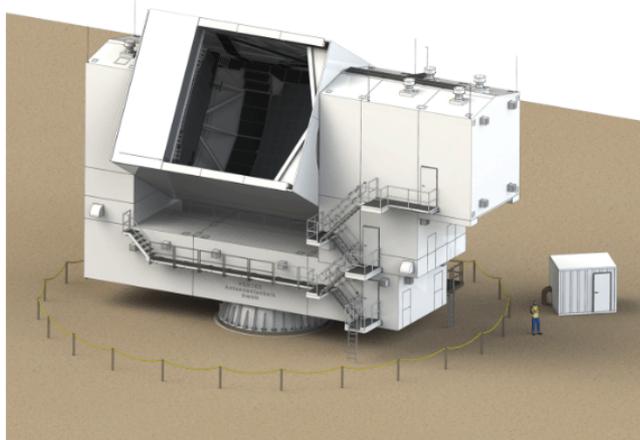
NOEMA (NORthern Extended Millimeter Array; (рис. 5)). Число 15-м антенн удвоено и теперь достигает 12. Длина базы интерферометра теперь достигает 1,7 км (в направлении восток – запад).

Существующие миллиметровые и субмиллиметровые инструменты имеют высокое разрешение, но довольно малое поле зрения, что ограничивает их возможности, в частности, в исследованиях протяжённых областей. В связи с этим активно обсуждаются (и реализуются) проекты создания крупных субмиллиметровых телескопов с большим полем зрения, в котором могли бы размещаться матричные приёмники с очень большим числом элементов. Самым амбициозным является проект The Atacama Large Aperture Submillimeter Telescope (AtLAST) — радиотелескоп диаметром  $\sim 50$  м с рабочим диапазоном до  $\sim 1$  ТГц и полем зрения  $\sim 2^\circ$  [142]. По пропускной способности (throughput — произведению эффективной площади на поле зрения) он не будет иметь себе равных. Ключевые научные задачи AtLAST включают в себя обзоры плоскости Галактики, исследования скрытых компонентов окологалактической среды, субмиллиметровые внегалактические обзоры типа SDSS, исследования эффекта Сюняева – Зельдовича в галактиках и скоплениях галактик с высоким разрешением.

Проект AtLAST пока только обсуждается. Но уже завершено создание телескопа меньшего размера, но с примерно такой же пропускной способностью. Это Fred Young Submillimeter Telescope (FYST, прежнее название CCAT-prime; (рис. 6)) [143]. При значительно меньшем диаметре (6 м) он обладает полем зрения  $\sim 8^\circ$ . Телескоп уже доставлен на предусмотренную для него площадку на высоте 5600 м в пустыне Атакама в Чили. "Первый свет" ожидается в 2026 г. Этот телескоп оснащён болометрическими модулями на диапазоны от 1,3 мм до 350 мкм с большим числом элементов ( $\sim 40000$  на 350 мкм [144]), а также матричными гетеродинными приёмниками  $8 \times 8$  элементов на диапазоны 650 мкм и 350 мкм [145].

Известный проект строительства 70-м радиотелескопа миллиметрового диапазона длин волн на плато Суффа в Узбекистане [146, 147] также предусматривает большое поле зрения. Но перспективы реализации этого проекта пока неясны. Обсуждаются варианты строительства на этой площадке антенны меньшего диаметра, которая могла бы работать в сети РСДБ, или решётки небольших антенн. Возможные задачи для них обсуждаются в работе [148].

Успех проекта "Телескоп Горизонта Событий" способствует планам значительного расширения этой сис-



**Рис. 6.** Субмиллиметровый телескоп имени Фреда Янга FYST (Fred Young Submillimeter Telescope; прежнее название CCAT-prime). Диаметр 6 м, поле зрения  $\sim 8^\circ$ . Установлен на высоте 5600 м в пустыне Атакама в Чили. ©FYST.



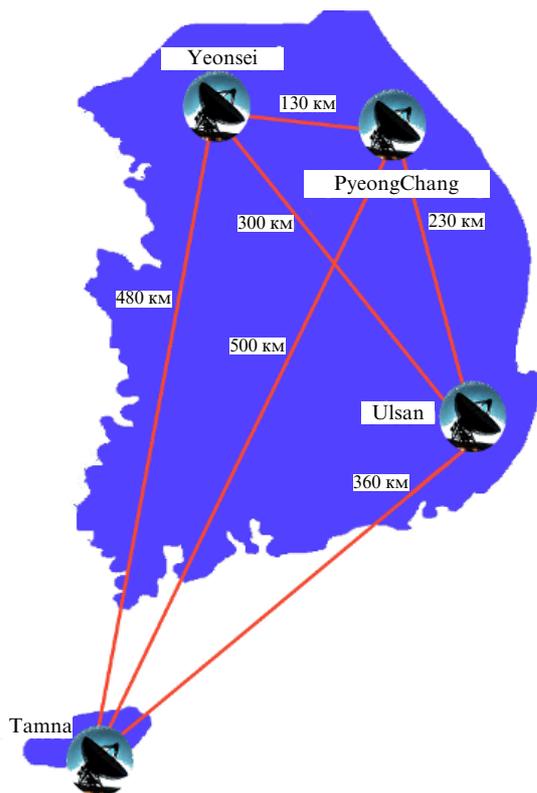
**Рис. 7.** Планируемые места расположения антенн очень большой решётки (Very Large Array) НРАО следующего поколения (ngVLA). ©NRAO.

темы [149]. Ведётся анализ атмосферных условий в нескольких десятках потенциальных мест размещения антенн, которые могли бы участвовать в измерениях по этому проекту [150]. Оценки показывают, что значительная часть из них вполне пригодна для этой цели.

Одним из самых эффективных радиоастрономических инструментов является очень большая решётка (Very Large Array — VLA) Национальной радиоастрономической обсерватории (НРАО) США. Она работает на частотах до  $\sim 50$  ГГц. Проект VLA нового поколения (ngVLA [151]) предполагает строительство 244 18-м антенн на значительной части территории США (рис. 7). Рабочий диапазон этой системы составит от 1,2 до 116 ГГц.

Недавно была расширена корейская сеть РСДБ, работающая в миллиметровом диапазоне длин волн (KVN). Теперь она состоит из четырёх антенн диаметром 21 м. Точность поверхности последней, недавно установленной антенны лучше 100 мкм. Длина баз достигает 500 км (рис. 8).

К сожалению, пока в распоряжении российских радиоастрономов нет инструментов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, сравнимых с зарубежными по своим возможностям. Для наблюдений в кон-



**Рис. 8.** Расположение антенн корейской сети РСДБ, работающей в миллиметровом диапазоне длин волн (KVN). ©KVN.

тинууме и в спектральных линиях в диапазоне длин волн 3–4 мм довольно успешно использовался 22-м радиотелескоп РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории (КраО), построенный в 1960-х годах (рис. 9). Были выполнены обзоры большого числа молекулярных облаков, связанных с областями Шарплеса в линиях HCN, HCO<sup>+</sup> и их изотопологов [74–76, 152, 153]. Наблюдались и тёмные облака [154, 155]. Однако, точность поверхности этой антенны невысока ( $\lesssim 250$  мкм). КИП на длине волны 3,4 мм составляет  $\sim 20\%$  вблизи зенита и быстро падает на низких углах [156].

Лучшую поверхность имеют 7.8-м антенны МГТУ им. Баумана ( $\sim 100$  мкм) и 13-м антенны ИПА РАН ( $\sim 60$  мкм) (см. рис. 9). Эти антенны могли бы достаточно эффективно использоваться в окнах прозрачности атмосферы на длинах волн 3 и 2 мм, но на более коротких волнах их использование невозможно из-за слишком большого поглощения в атмосфере в местах их расположения.

Таким образом, создание современного радиотелескопа (или радиотелескопов) для работы в коротковолновой части миллиметрового диапазона и по крайней мере в окне прозрачности атмосферы на длине волны 0,85 мм является насущной задачей для российской радиоастрономии. Это позволит решать многие из перечисленных выше актуальных научных задач, в том числе участвуя в международных проектах типа Телескопа Горизонта Событий.

Имеется несколько проектов и предложений по созданию таких инструментов разной степени проработки. Так, в CAO РАН рассматривается проект создания телескопа диаметром  $\sim 15$  м с рабочими диапазонами длин волн до 1,3 мм [157]. В качестве предварительного этапа

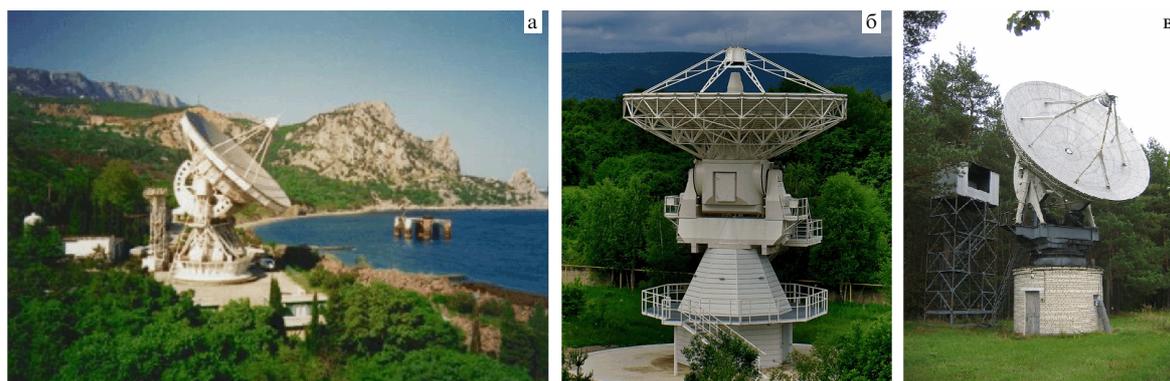


Рис. 9. (а) РТ-22 КрАО РАН, построен в 1966 г. СКО поверхности  $\leq 0,25$  мм КИП (3,4 мм)  $\sim 20\%$  [156]. (б) Один из трёх радиотелескопов РТ-13 ИПА РАН. СКО поверхности  $\sim 0,06$  мм. Изготовитель VERTEX ANTENNENTECHNIK GmbH. (в) РТ-7.5 МГТУ им. Баумана в Подмоскowie. СКО поверхности  $\sim 0,1$  мм.

идёт работа по организации наблюдений в миллиметровом диапазоне длин волн на 6-м оптическом телескопе БТА. В АКЦ ФИАН прорабатывается проект создания антенной решётки, состоящей из антенн сравнительно небольшого диаметра (3–8 м) с рабочим диапазоном длин волн до 0,8 мм [139]. Существует концепция Евразийского субмиллиметрового телескопа (ESMT), состоящего из нескольких антенн диаметром 15–20 м на территории РФ, Китая и Узбекистана [158]. Есть предложение о строительстве субмиллиметровой антенной решётки, состоящей из антенн диаметром  $\sim 15$  м на Восточном Памире в Таджикистане [159]. Также в качестве идеального места для строительства субмиллиметрового телескопа предлагается станция "Восток" в Антарктиде (С.А. Гребнев *Земля и Вселенная* 6(360) 103 (2024)).

Надо отметить, что задачи для одиночных антенн и антенных решёток несколько различаются. Первые больше подходят для исследования протяжённых структур, в то время как интерферометры, позволяя изучать компактные объекты, теряют информацию о низких пространственных частотах. Часто используется комбинирование данных, полученных на интерферометрах и на одиночных антеннах. Таким образом, такие системы дополняют друг друга.

При выборе мест размещения миллиметровых и субмиллиметровых антенн основное значение имеет статистика атмосферного поглощения, которое в этом диапазоне определяется главным образом содержанием кислорода, водяного пара и жидкой воды в атмосфере. Поглощение излучения кислородом стабильно и в окнах прозрачности атмосферы достаточно хорошо описывается экспоненциальной зависимостью от высоты с характерной высотой  $\sim 5,3$  км [160]. Содержание же воды в разных формах сильно переменено. Таким образом, анализ пригодности того или иного места для миллиметровой и субмиллиметровой астрономии основан на измерениях и оценках либо атмосферного поглощения в этом диапазоне, либо количества осаждаемого водяного пара и жидкой воды в облаках.

Краткое описание методов и основных результатов таких измерений и оценок представлено в обзоре [161]. Поглощение излучения в атмосфере оценивается по её собственному излучению. Для этого используется либо так называемый метод атмосферных разрезов (по относительным измерениям интенсивности излучения на разных зенитных углах), либо метод абсолютных измерений

яркостной температуры неба. Для измерений содержания водяного пара в атмосфере используются специализированные радиометры, работающие на частотах, близких к частотам переходов  $H_2O$  (обычно 22 или 183 ГГц [162, 163]). Также для этой цели проводятся измерения задержек сигналов глобальных навигационных систем (GNSS) [164].

Прозрачность атмосферы можно оценить на основе подхода, используемого для моделирования задержки распространения сигнала в нейтральной атмосфере [165]. Используются публично доступные данные NASA Global Modeling and Assimilation Office model GEOS-FPIT<sup>2</sup> [159]. Они оценивают параметры атмосферы (в частности, температуру воздуха, общее атмосферное давление и парциальное давление водяного пара) с помощью различных наземных, воздушных и космических измерений, которые интегрируются в динамическую модель. Текущие модели включают 72 уровня высоты, пространственное разрешение  $0,25^\circ \times 0,31^\circ$  и разрешение по времени 3 часа. Атмосферное поглощение на любой частоте можно рассчитать для любого выбранного места, используя стандартные спектроскопические параметры (например, [159]). Подобные данные также имеются в Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) [166] и в European Center for Medium-Range Weather Forecast ReAnalysis (ERA5) [167]. Однако в местностях со сложным рельефом пространственное разрешение таких моделей оказывается недостаточным и требуются локальные исследования.

В результате этих исследований было выделено несколько мест на территории Российской Федерации, потенциально пригодных для строительства субмиллиметрового телескопа. Одно из таких мест — это пик Терскол на западном Кавказе, где уже имеется действующая оптическая обсерватория. Влагосодержание в целом меньше на восточном Кавказе. Одно из возможных мест там — гора Курапдаг (3750 м). Однако заметно лучшие характеристики атмосферного поглощения были получены для пика Хулугайша в Бурятии. Условия там сравнимы с теми, которые наблюдаются на Памире и в Тибете. Восточный Памир по характеристикам атмосферного поглощения приближается к пустыне Атакама [159]. Конечно, с точки зрения атмосферной прозрачности вне конкуренции Антарктида.

<sup>2</sup> <http://gmao.gsfc.nasa.gov>.



Рис. 10. Созданный в ИПФ РАН в сотрудничестве с ИРЭ РАН и рядом других организаций двухдиапазонный (3 и 2 мм) СИС приёмник на 14-м радиотелескопе Обсерватории Мецахови в Финляндии (2004 г.).

Помимо статистики атмосферного поглощения, при выборе места расположения новых инструментов желательно учитывать эффективность их использования в глобальных интерферометрических сетях, прежде всего в составе Телескопа Горизонта Событий. Оценки, выполненные А.П. Лобановым (частное сообщение) показывают, что с точки зрения совместных наблюдений с ТГС оптимальными являются местоположения на Кавказе и в Средней Азии примерно до  $70^\circ$  восточной долготы.

Создание подобного инструмента требует научного и технического задела. В Российской Федерации такой задел имеется. Ещё в 1990-х гг. в ИПФ РАН в сотрудничестве с ИРЭ РАН и рядом других организаций был создан СИС приёмник диапазона длин волн 3 мм, который успешно работал на РТ-22 КрАО [153], а в начале 2000-х гг. двухдиапазонный (3 и 2 мм) СИС приёмник для 14-м радиотелескопа Обсерватории Мецахови в Финляндии (рис. 10).

В настоящее время в ИРЭ РАН, АКЦ ФИАН, ИПФ РАН, ИФМ РАН и других организациях успешно ведутся разработки приёмных систем миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на передовом мировом уровне. Они включают в себя как гетеродинные (для наблюдений спектральных линий), так и болометрические приёмники (например, [168–173]). Как видно из вышесказанного, имеется большой опыт проведения астрофизических исследований на коротких миллиметровых и субмиллиметровых волнах с использованием имеющихся в России и в мире инструментов.

#### 4. Заключение

1. Миллиметровая и субмиллиметровая астрономия является важнейшим и часто уникальным источником информации для решения ряда актуальных астрофизических проблем, в том числе в исследованиях межзвёздной среды и компактных объектов.

2. К настоящему времени методами миллиметровой и субмиллиметровой астрономии получено много важных результатов в различных областях астрофизических исследований. При этом остаётся большое количество актуальных нерешённых задач, что стимулирует дальнейший прогресс в данной области.

3. Инструментальная база миллиметровой и субмиллиметровой астрономии в мире активно развивается. Россия сильно отстаёт в этой области. В РФ нет конкурентоспособных радиотелескопов на волны  $\lambda \lesssim 3$  мм. В то же время в РФ есть неплохой задел в проведении научных исследований в этом диапазоне и в разработке приёмной аппаратуры.

4. Создание хотя бы одного достаточно крупного телескопа данного диапазона позволит значительно повысить уровень проводимых в стране астрофизических исследований и включиться в международные проекты (Телескоп Горизонта Событий).

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FFUF-2024-0028. Автор благодарен за полезные обсуждения Ю.Ю. Балеге, Г.Г. Валявину, В.Ф. Вдовину, Д.З. Вибе, П.М. Землянхуе, А.В. Ипатову, М.С. Кирсановой, Ю.Ю. Ковалеву, Е.А. Копылову, А.В. Лапинову, С.Ф. Лихачеву, А.П. Лобанову, Л.Е. Пирогову, А.Г. Рудницкому, В.А. Столярову, В.Б. Хайкину, Б.М. Шустову, Thijs de Graauw.

#### Список литературы

1. Кисляков А Г *УФН* **101** 607 (1970); Kislyakov A G *Sov. Phys. Usp.* **13** 495 (1971)
2. Зинченко И И *Изв. вузов. Радиофизика* **46** 641 (2003); Zinchenko I I *Radiophys. Quantum Electron.* **46** 577 (2003)
3. Wilson T L, Guilloteau S *Millimeter Astronomy* (Saas-Fee Advanced Course, Vol. 38, Eds M Dessauges-Zavadsky, D Pfenninger) (Berlin: Springer, 2018) DOI:10.1007/978-3-662-57546-8
4. Reinacher A et al. *J. Astron. Instrum.* **7** 1840007 (2018)
5. Pilbratt G L et al. *Astron. Astrophys.* **518** L1 (2010)
6. Кардашёв Н С и др. *УФН* **184** 1319 (2014); Kardashev N S et al. *Phys. Usp.* **57** 1199 (2014)
7. Новиков И Д и др. *УФН* **191** 404 (2021); Novikov I D et al. *Phys. Usp.* **64** 386 (2021)
8. Akiyama K et al. (The Event Horizon Telescope Collab.) *Astrophys. J. Lett.* **875** L1 (2019)
9. Akiyama K et al. (The Event Horizon Telescope Collab.) *Astrophys. J. Lett.* **910** L13 (2021)
10. Akiyama K et al. (Event Horizon Telescope Collab.) *Astrophys. J. Lett.* **930** L12 (2022)
11. Zeldovich Ya B, Sunyaev R A *Astrophys. Space Sci.* **4** 301 (1969)
12. Зинченко И И *Письма в Астрон. журн.* **5** 435 (1979); Zinchenko I I *Sov. Astron. Lett.* **5** 233 (1979)
13. Rowan-Robinson M, Negroponte J, Silk J *Nature* **281** 635 (1979)
14. Negroponte J, Silk J, Rowan-Robinson M *Astrophys. J.* **248** 38 (1981)
15. Зинченко И И *Письма в Астрон. журн.* **15** 771 (1989); Zinchenko I I *Sov. Astron. Lett.* **15** 333 (1989)
16. Дубрович В К *Письма в Астрон. журн.* **3** 243 (1977); Dubrovich V K *Sov. Astron. Lett.* **3** 128 (1977)
17. Galli D, Palla F *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **51** 163 (2013)
18. Dubrovich V, Bajkova A, Khaikin V B *New Astron.* **13** 28 (2008)
19. de Bernardis P et al. *Astron. Astrophys.* **269** 1 (1993)
20. Persson C M et al. *Astron. Astrophys.* **515** A72 (2010)
21. Zinchenko I, Dubrovich V, Henkel C *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **415** L78 (2011)
22. Shchekinov Yu A, Nath B B *Galaxies* **13** (3) 64 (2025)
23. Kamionkowski M, Kovetz E D *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **54** 227 (2016)
24. Adachi S et al. (The Polarbear Collab.) *Astrophys. J.* **897** 55 (2020)
25. Ade P A R et al. (BICEP2 Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **112** 241101 (2014)
26. Kovalev Yu Y et al. *Galaxies* **11** (4) 84 (2023)
27. Plavin A V et al. *Astrophys. J.* **908** 157 (2021)
28. Plavin A V et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **523** 1799 (2023)
29. Imanishi M, in *Cosmic Masers: Proper Motion Toward the Next-Generation Large Projects* (Proc. of the Intern. Astronomical Union,

- Vol. 380, Eds T Hirota et al.) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2024) p. 23–35, DOI:10.1017/S1743921323002478
30. Kovalev Yu A, Kovalev Yu Y, in *AGN Variability from X-Rays to Radio Waves* (ASP Conf. Ser., Vol. 360, Eds C M Gaskell et al.) (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2007) p. 137
  31. Kovalev Yu A et al., in *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, roceedings of the All-Russian Conf., Nizhnii Arkhyz, 21–25 September 2020* (Eds I I Romanyuk et al.) (Nizhnii Arkhyz: SAO RAS, 2020) p. 355–363, DOI:10.26119/978-5-6045062-0-2\_2020\_355
  32. Сотникова Ю В и др. *Астрофиз. бюл.* **77** 397 (2022); Sotnikova Yu V et al. *Astrophys. Bull.* **77** 361 (2022)
  33. Вольвач А Е и др. *Астрон. журн.* **93** 605 (2016); Volvach A E et al. *Astron. Rep.* **60** 621 (2016)
  34. Agudo I et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **474** 1427 (2018)
  35. Agudo I, Thum C *Galaxies* **10** (4) 87 (2022)
  36. Blain A W et al. *Phys. Rep.* **369** 111 (2002)
  37. Ling C, Yan H *Astrophys. J.* **929** 40 (2022)
  38. Casey C M, Narayanan D, Cooray A *Phys. Rep.* **541** 45 (2014)
  39. Sunyaev R A, Zeldovich Ya B *Comments Astrophys. Space Phys.* **4** 173 (1972)
  40. Hilton M et al. *Astrophys. J. Suppl.* **253** (1) 3 (2021)
  41. Kornoele K et al., arXiv:2503.17271; *Astrophys. J.*, submitted
  42. Remazeilles M, Chluba J *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **494** 5734 (2022)
  43. Hand N et al. *Phys. Rev. Lett.* **109** 041101 (2012)
  44. Hadzhiyska B et al., arXiv:2407.07152
  45. Guachalla B R et al. *Phys. Rev. D* **112** 103512 (2025); arXiv:2503.19870
  46. Dame T M, Hartmann D, Thaddeus P *Astrophys. J.* **547** 792 (2001)
  47. Schuller F et al. *Astron. Astrophys.* **504** 415 (2009)
  48. Csengeri T et al. *Astron. Astrophys.* **565** A75 (2014)
  49. Aguirre J E et al. *Astrophys. J. Suppl.* **192** 4 (2011)
  50. Jackson J M et al. *Astrophys. J. Suppl.* **163** 145 (2006)
  51. Benjamin R A et al. *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **115** 953 (2003)
  52. Carey S J et al. *Bull. Am. Astron. Soc.* **37** 63.33 (2005)
  53. Molinari S et al. *Astron. Astrophys.* **591** A149 (2016)
  54. Wright E L et al. *Astron. J.* **140** 1868 (2010)
  55. Myers P C, Linke R A, Benson P J *Astrophys. J.* **264** 517 (1983)
  56. Myers P C, Benson P J *Astrophys. J.* **266** 309 (1983)
  57. Myers P C *Astrophys. J.* **270** 105 (1983)
  58. Benson P J, Myers P C *Astrophys. J.* **270** 589 (1983)
  59. Myers P C et al. *Astrophys. J.* **324** 907 (1988)
  60. Myers P C et al. *Astrophys. J.* **376** 561 (1991)
  61. Fuller G A, Myers P C *Astrophys. J.* **384** 523 (1992)
  62. Goodman A A et al. *Astrophys. J.* **406** 528 (1993)
  63. Vilas-Boas J W S, Myers P C, Fuller G A *Astrophys. J.* **433** 96 (1994)
  64. Ladd E F, Myers P C, Goodman A A *Astrophys. J.* **433** 117 (1994)
  65. Benson P J, Caselli P, Myers P C *Astrophys. J.* **506** 743 (1998)
  66. Vilas-Boas J W S, Myers P C, Fuller G A *Astrophys. J.* **532** 1038 (2000)
  67. Caselli P et al. *Astrophys. J.* **572** 238 (2002)
  68. Myers P C, in *Protostars and Planets II* (Eds D C Black, M S Matthews) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 1985) p. 81–103
  69. Benson P J, Myers P C *Astrophys. J. Suppl.* **71** 89 (1989)
  70. Goodman A A et al. *Astrophys. J.* **359** 363 (1990)
  71. McKee C F, Ostriker E C *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **45** 565 (2007)
  72. Tan J C et al., in *Protostars and Planets VI* (Eds H Beuther et al.) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2014) p. 149–172
  73. Zinchenko I I *Astron. Astrophys. Trans.* **33** 355 (2023)
  74. Буров А Б и др. *Письма в Астрон. журн.* **14** 492 (1988); Burov A B et al. *Sov. Astron. Lett.* **14** 209 (1988)
  75. Зинченко И И, Лапинов А В, Пирогов Л Е *Астрон. журн.* **66** 1142 (1989); Zinchenko I I, Lapinov A V, Pirogov L E *Sov. Astron.* **33** 590 (1989)
  76. Зинченко И И и др. *Астрон. журн.* **67** 908 (1990); Zinchenko I I et al. *Astron. J.* **34** 458 (1990)
  77. Zinchenko I et al. *Astron. Astrophys.* **288** 601 (1994)
  78. Zinchenko I, Mattila K, Toriseva M *Astron. Astrophys. Suppl.* **111** 95 (1995)
  79. Zinchenko I *Astron. Astrophys.* **303** 554 (1995)
  80. Pirogov L et al. *Astron. Astrophys. Trans.* **11** (3) 287 (1996)
  81. Zinchenko I, Henning T, Schreyer K *Astron. Astrophys. Suppl.* **124** 385 (1997)
  82. Lapinov A V et al. *Astron. Astrophys.* **336** 1007 (1998)
  83. Zinchenko I, Pirogov L, Toriseva M *Astron. Astrophys. Suppl.* **133** 337 (1998)
  84. Zinchenko I, Henkel C, Mao R Q *Astron. Astrophys.* **361** 1079 (2000)
  85. Pirogov L et al. *Astron. Astrophys.* **405** 639 (2003)
  86. Pirogov L et al. *Astron. Astrophys.* **461** 523 (2007)
  87. Zinchenko I, Caselli P, Pirogov L *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **395** 2234 (2009)
  88. Zinchenko I, Henkel C, in *Astrochemistry VII: Through the Cosmos from Galaxies to Planets, Proc. of the Intern. Astronomical Union* (IAU Symp., Vol. 332, Eds M Cunningham, T Millar, Y Aikawa) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2018) p. 274, DOI:10.1017/S1743921317007694
  89. Малафеев С Ю и др. *Письма в Астрон. журн.* **31** 262 (2005); Malafeev S Yu et al. *Astron. Lett.* **31** 239 (2005)
  90. Malafeev S Yu, Zinchenko I I, in *Star Formation in the Galaxy and Beyond, Proc. of the Conf. Star Formation in the Galaxy and Beyond, Moscow, Russia, 17–18 April 2006* (Eds D S Wiebe, M S Kirsanova) (Moscow: Yanus-K, 2006) p. 29
  91. André P et al., in *Protostars and Planets VI* (Eds H Beuther et al.) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2014) pp. 27–51
  92. Beuther H et al. *Astron. Astrophys.* **584** A67 (2015)
  93. Kainulainen J et al. *Astron. Astrophys.* **586** A27 (2016)
  94. Dewangan L K et al. *Astrophys. J. Lett.* **807** L4 (2019)
  95. Clarke S D, Whitworth A P *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **449** 1819 (2015)
  96. Nakamura F et al. *Astrophys. J. Lett.* **791** L23 (2014)
  97. Fukui Y et al. *Astrophys. J. Lett.* **807** L4 (2015)
  98. Dewangan L K, Ojha D K, Zinchenko I *Astrophys. J.* **851** 140 (2017)
  99. Inoue T et al. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **70** S53 (2018)
  100. di Francesco J et al., in *Protostars and Planets V* (Eds B Reipurth, D Jewitt, K Keil) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2007) p. 17
  101. Lada C J, in *Star Forming Regions* (IAU Symp., Vol. 115, Eds M Peimbert, J Jugaku) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987) p. 1
  102. Andre P, Ward-Thompson D, Barsony M *Astrophys. J.* **406** 122 (1993)
  103. Andre P, Ward-Thompson D, Barsony M, in *Protostars and Planets IV* (Eds V Mannings, A P Boss, S S Russell) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2000) p. 59
  104. Louvet F, in *SF2A-2018: Proc. of the Annual Meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics, 2018* (Eds P Di Matteo et al.) p. 311
  105. Beltrán M T, de Wit W J *Astron. Astrophys. Rev.* **24** 6 (2016)
  106. Arce H G et al., in *Protostars and Planets V* (Eds B Reipurth, D Jewitt, K Keil) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2007) p. 245–260
  107. Hunter T R et al. *Astrophys. J. Lett.* **837** L29 (2017)
  108. Caratti o Garatti A et al. *Nature Phys.* **13** 276 (2017)
  109. Liu S-Y et al. *Astrophys. J. Lett.* **863** L12 (2018)
  110. Fujisawa K et al., The Astronomer's Telegram, No. 8286 (2015)
  111. Moscadelli L et al. *Astron. Astrophys.* **600** L8 (2017)
  112. Zinchenko I et al. *Astron. Astrophys.* **606** L6 (2017)
  113. Hunter T R et al. *Astrophys. J.* **854** 170 (2018)
  114. Meyer D M-A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **464** L90 (2017)
  115. Wolf V et al. *Astron. Astrophys.* **688** A8 (2024)
  116. Кирсанова М С и др. *УФН* **195** 294 (2025); Kirsanova M S et al. *Phys. Usp.* **68** 278 (2025)
  117. Roueff E, Parise B, Herbst E *Astron. Astrophys.* **464** 245 (2007)
  118. Трофимова Е А и др. *Астрон. журн.* **97** 225 (2020); Trofimova E A et al. *Astron. Rep.* **64** 244 (2020)
  119. Трофимова Е А и др. *Астрон. журн.* **101** 693 (2024); Trofimova E A et al. *Astron. Rep.* **68** 771 (2024)
  120. Zinchenko I I et al. *PoS MUTO2022* 038 (2022) DOI:10.22323/1.425.0038
  121. Pazukhin A G et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **526** 3673 (2023)
  122. Levshakov S A, arXiv:1603.01262
  123. Olive K A, Pospelov M *Phys. Rev. D* **77** 043524 (2008)
  124. Levshakov S A et al. *Astron. Astrophys.* **524** A32 (2010)
  125. Levshakov S A et al., in *From Varying Couplings to Fundamental Physics. Proc. of Symp. I of JENAM 2010* (Eds C Martins, P Molaro) (Berlin: Springer, 2011) p. 103, DOI:10.1007/978-3-642-19397-2\_11
  126. Levshakov S A et al. *Astron. Astrophys.* **559** A91 (2013)
  127. Levshakov S A et al. *Memorie Soc. Astron. Italiana* **85** 90 (2014); arXiv:1307.8266
  128. Levshakov S A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **511** 413 (2022)
  129. Daprà M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **472** 4434 (2017)
  130. Vorotyntseva J S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **527** 2750 (2024)
  131. Воротынцева Ю С, Левшаков С А *Письма в ЖЭТФ* **121** 619 (2025); Vorotyntseva J S, Levshakov S A *JETP Lett.* **121** 589 (2025)
  132. Воротынцева Ю С, Левшаков С А, Хенкель К *Письма в ЖЭТФ* **122** 709 (2025); Vorotyntseva J S, Levshakov S A, Henkel C *JETP Lett.* **122** 715 (2025); arXiv:2506.04258
  133. Голубятников Г Ю и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **56** 666 (2013); Golubiatnikov G Yu et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **56** 599 (2014)
  134. Алексеев Р А и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **64** 971 (2021); Alekseev R A et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **64** 873 (2022)
  135. Benisty M et al. *Astrophys. J. Lett.* **916** L2 (2021)
  136. Зайцев В В, Степанов А В, Мельников В Ф *Письма в Астрон. журн.* **39** 726 (2013); Zaitsev V V, Stepanov A V, Melnikov V F *Astron. Lett.* **39** 650 (2013)
  137. Greaves J S et al. *Nature Astron.* **5** 655 (2021)
  138. Wiedner M C et al. *Exp. Astron.* **51** 595 (2021)
  139. Лихачев С Ф и др. *Космические исслед.* **62** 121 (2024); Likhachev S F et al. *Cosmic Res.* **62** 117 (2024)
  140. Лихачев С Ф и др. *Письма в Астрон. журн.* **50** 862 (2024); Likhachev S F et al. *Astron. Lett.* **50** 830 (2024)
  141. Hughes D H et al. *Proc. SPIE* **11445** 1144522 (2020) DOI:10.1117/12.2561893

142. Klaassen P D et al. *Proc. SPIE* **11445** 114452F (2020) DOI:10.1117/12.2561315
143. Stacey G J et al. *Proc. SPIE* **12182** 1218210 (2022) DOI:10.1117/12.2630380
144. Chapman S C et al. *Proc. SPIE* **12190** 1219005 (2022) DOI:10.1117/12.2630628
145. Graf U U et al., in *Physics and Chemistry of Star Formation: The Dynamical ISM Across Time and Spatial Scales. Proc. of the 7th Chile–Cologne–Bonn Symp., 26–30 September, 2022, Puerto-Varas, Chile* (Eds V Ossenkopf-Okada et al.) (Köln: Univ.- und Stadtbibliothek, Univ. zu Köln, 2023) p. 339
146. Hojaev A S, Shanin G I, in *Enhancing Astronomical Research and Education in Developing Countries, 23rd Meeting of the IAU, 26 August 1997, Kyoto, Japan* (Joint Discussion 20) abstract ID 3
147. Hojaev A, Shanin G I, Artyomenko Yu N, in *Astronomy for the Developing World. 26th Meeting of the IAU, 21–22 August, 2006, Prague, Czech Republic* (IAU Special Session, 5, Eds J B Hearnshaw, P Martinez) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007) p. 177, DOI:10.1017/S1743921307006965
148. Ходжаев А С, Зинченко И И *Астрофиз. бюл.* **80** 145 (2025); Hojaev A S, Zinchenko I I *Astrophys. Bull.* **80** 140 (2025)
149. Doeleman S S et al. *Galaxies* **11** (5) 107 (2023)
150. Raymond A W et al. *Astrophys. J. Suppl.* **253** 5 (2021)
151. DeCesar M (ngVLA Science Working Group 4) *Bull. Am. Astron. Soc.* **55** 119.05 (2023)
152. Шульга В М и др. *Письма в Астрон. журн.* **17** 1084 (1991); Shulga V M et al. *Sov. Astron. Lett.* **17** 448 (1991)
153. Зинченко И И и др. *Письма в Астрон. журн.* **23** 123 (1997); Zinchenko I I et al. *Astron. Lett.* **23** 123 (1997)
154. Буров А Б и др. *Астрон. журн.* **59** 267 (1982); Burov A B et al. *Sov. Astron.* **26** 163 (1982)
155. Zinchenko I I, Kislyakov A G *Lecture Notes Phys.* **237** 72 (1985) DOI:10.1007/3-540-15991-6\_78
156. Antyufeyev A V et al. *Radio Phys. Radio Astron.* **14** 345 (2009)
157. Столяров В А и др. *Астрофиз. бюл.* **79** 331 (2024); Stolyarov V A et al. *Astrophys. Bull.* **79** 321 (2024)
158. Khaikin V et al., in *7th All-Russian Microwave Conf., RCM, Moscow, Russia, 25–27 November 2020* (2020) p. 47, DOI:10.1109/RMCS0626.2020.9312233
159. Lapinov A V et al. *Proc. SPIE* **11453** 114532O (2020) DOI:10.1117/12.2560250
160. Кисляков А Г, Станкевич К С *Изв. вузов. Радиофизика* **10** 1244 (1967); Kislyakov A G, Stankevich K S *Radiophys. Quantum Electron.* **10** 695 (1967)
161. Zinchenko I I et al. *Appl. Sci.* **13** 11706 (2023)
162. Арсаев И Е и др. *Измерительная техника* (5) 60 (2017); Arsaev I E et al. *Meas. Tech.* **60** 497 (2017)
163. Nikolic B et al. *Astron. Astrophys.* **552** A104 (2013)
164. Bevis M et al. *J. Geophys. Res.* **97** 15787 (1992) DOI:10.1029/92JD01517
165. Petrov L, arXiv:1502.06678
166. Gelaro R et al. *J. Climate* **30** 5419 (2017) DOI:10.1175/JCLI-D-16-0758.1
167. Hersbach H et al. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* **146** 1999 (2020)
168. Филиппенко Л В и др. *УФН* **194** 1207 (2024); Filippenko L V et al. *Phys. Usp.* **67** 1139 (2024)
169. Khudchenko A et al. *Proc. SPIE* **13102** 131022A (2024) DOI:10.1117/12.3022620
170. Tretyakov I V et al. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **15** (2) 191 (2025) DOI:10.1109/TTHZ.2024.3505592
171. Балега Ю Ю и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **63** 533 (2020); Balega Yu Yu et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **63** 479 (2020)
172. Balega Yu et al. *Sensors* **24** (2) 359 (2024)
173. Kuzmin L S et al. *Commun. Phys.* **2** 104 (2019) DOI:10.1038/s42005-019-0206-9

## Current tasks and prospects of millimeter and submillimeter astronomy

### I.I. Zinchenko

A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences,  
ul. Ulyanova 46, 603951 Nizhny Novgorod, Russian Federation  
E-mail: zin@ipfran.ru

An overview of the main research areas, the most important results and current scientific problems of millimeter and submillimeter astronomy is presented. The prospects for the development of this area in the world and in the Russian Federation are discussed.

**Keywords:** millimeter and submillimeter astronomy, radio telescopes, radio interferometers, atmospheric transparency

PACS numbers: 95.55.Jz, **98.58.–w**, 98.70.Vc

Bibliography — 173 references

Received 26 July 2025

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **196** (3) 290–301 (2026)

*Physics – Uspekhi* **69** (3) (2026)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.03.039996>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2025.03.039996>