

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.9>

УДК: 520.16, 681.7

О ПРОЕКТЕ ЕВРАЗИЙСКИХ СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ТЕЛЕСКОПОВ (ESMT) И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА СУБММ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.Б. Хайкин¹, А.Ю. Шиховцев², В.Е. Шмагин³, М.К. Лебедев¹,
Е.А. Копылов^{3,4}, В.П. Лукин⁴, П.Г. Ковадло²

¹ Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН
196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65, к. 1, лит. АУ

² Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 126а

³ Институт астрономии РАН

119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48

⁴ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
г. Томск, площадь Академика Зуева, 1

Статья поступила в редакцию 21 мая 2022 г.

Аннотация. Актуальные задачи в субмиллиметровой астрономии требуют создания инструментов, сочетающих высокую чувствительность, угловое разрешение, широкое поле зрения и многоволновый (многоцветный) спектральный диапазон. В настоящее время новые одиночные мм/субмм телескопы очень востребованы в Евразии, так же как и их включение в сеть РСДБ Event Horizon Telescope (ЕНТ). Концепция проекта Eurasian Submillimeter Telescopes (ESMT) предполагает строительство трех конструктивно идентичных мм/субмм радиотелескопов класса 15-21 м на плато Суффа, Узбекистан (2400 м или выше), в РФ (3000 м или выше) и на Тибете, КНР (выше 5000 м). Рассмотрена концепция ESMT, где за отправную точку взята конструкция европейских антенн ALMA. Диаметр антенны должен быть увеличен с 12 м до 21 м, соответствующим образом изменятся оптическая схема и конструкция ферменного каркаса, добавлены третичная оптика и «активная поверхность», в

работе предложены средства ее оперативной диагностики. В статье представлены варианты оптической схемы ESMT и третичной оптики, позволяющие удерживать компактный криостат с KID-матрицей в вертикальном положении для обеспечения его работоспособности при наклонах телескопа. Приводится сравнение возможностей ESMT с другими мм/субмм инструментами и проектами. Рассмотрены необходимые астроклиматические условия и характеристики сайтов ESMT, приведены оценки осажденной воды PWV, dPWV и доли покрытия неба облачностью TCC для ряда практически интересных сайтов, полученные с помощью баз реанализа ERA-Interim и ERA-5. Рассмотрены влияние турбулентности атмосферы на радиотелескоп, радиоастрономические методы подавления флуктуаций атмосферы и возможности применения адаптивной оптики, в частности «тип-тилт»-коррекции для улучшения качества субмм изображений.

Ключевые слова: субмиллиметровая астрономия, субмиллиметровый телескоп, астроклимат, адаптивная оптика.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках базового проекта Института солнечно-земной физики СО РАН "Методы и инструменты астрофизического эксперимента" (уникальный номер 0278-2021-0010), а также программы фундаментальных исследований СО РАН Института оптики атмосферы СО РАН "Исследование особенностей формирования оптических изображений и пучков излучения в атмосфере с использованием адаптивной оптики, включая распространение мощного, амплитудно- и фазово-модулированного оптического излучения" (FWRU-2021-0003)

Автор для переписки: Хайкин Владимир Борисович, vkhestu@mail.ru

Введение

Актуальные задачи в субмиллиметровой астрономии требуют создания инструментов, сочетающих высокую чувствительность, угловое разрешение, широкое поле зрения и многоволновый (многоцветный) спектральный диапазон. Возможные научные задачи для достаточно крупного субмм радиотелескопа, каким является в этом диапазоне 20-метровый телескоп, включают изучение звездообразования во Вселенной, поиск новых химических соединений, включая органические молекулы, в космосе, исследование эффекта Сюняева – Зельдовича в скоплениях галактик и первичных (космологических) молекул в ранней Вселенной. Новые одиночные мм/субмм телескопы сегодня очень востребованы в Евразии, так же как и их включение в ЕНТ для исследования сверхмассивных черных дыр, расположенных в центрах ближайших галактик. Между тем, в Азии вообще нет крупных мм/субмм радиотелескопов, тогда как подходящие высокогорные площадки существуют. Появление крупных мм/субмм телескопов в Азии давно назрело, поскольку соответствующее географическое расширение существующих и будущих сетей РСДБ значительно улучшит их наблюдательные возможности и качество получаемых изображений.

В этой связи актуальным является исследование астроклимата возможных площадок для размещения субмм телескопа в РФ [1] и развитие субТГц приемных технологий для наземных радиотелескопов [2-6]. В отсутствие наземных мм/субмм инструментов в РФ ведущие разработчики субТГц приемников в основном сосредоточены на разработках для космических и бортовых телескопов [7], а также на решении прикладных задач (мониторинг атмосферы, радиовидение, биомедицина). Настоящая работа продолжает поиск подходящих мест для размещения субмм телескопа в Евразии и изучение их астроклимата с помощью баз реанализа данных спутников дистанционного зондирования Земли.

Концепция проекта ESMT [8] была разработана специалистами САО РАН и ИПФ РАН совместно с EIE Group Srl. (Италия) и NАОС (КНР) в конце 2019 г. [9, 10]. В 2020-2021 г. к развитию концепции подключились специалисты ИНАСАН, ИФП РАН, ИСЗФ СО РАН, ИОА СО РАН, ГАИШ МГУ. В настоящей статье изложены основные положения концепции проекта ESMT и ее развитие в рамках подготовки проекта ESMT.

Для повышения эффективности субмм телескопов и улучшения качества получаемых изображений в условиях реальной атмосферы могут применяться методы адаптивной оптики (АО). АО широко применяются для улучшения качества изображений крупных оптических телескопов VLT, Keck, Subaru, Gemini и др. Методы АО развивались ранее для проекта крупного составного оптического телескопа АСТ-10 [11]. АО активно применяется на интерферометрах мм/субмм диапазона в частности на ALMA [12]. Сегодня методы АО необходимо развивать и для крупного одиночного субмм телескопа.

1. Концепция проекта ESMT

Концепция проекта ESMT разработана на основе выполненного ее авторами анализа, предполагает отказ от идеи использования радиотелескопа РТ-70 в Суффe (Узбекистан) для работы в мм/субмм диапазоне в случае его достройки. Вместо этого предлагается построить три новых высокоэффективных мм/субмм радиотелескопа класса 15-21 м на плато Суффа в Узбекистане ($39^{\circ}37'$ с. ш., $68^{\circ}26'$ в. д., 2400 м над уровнем моря или лучше на ближайшей горе Акташтау, 3383 м), в России (выше 3000 м над уровнем моря) и на Тибетском нагорье в КНР (выше 5000 м над уровнем моря). Планируемый верхний частотный диапазон работы инструментов ESMT 350-1500 ГГц в зависимости от места расположения. Строительство РТ-70 было бы разумно завершить для радиоастрономических применений во всем расширенном сантиметровом диапазоне волн (1-70 см) в соответствии с исходным проектом, подобно его существующим аналогам в Евпатории и Уссурйске. Возможность работы в мм диапазоне не была заложена в исходный проект РТ-70 (П-2500) 70-х годов

прошлого века. Его модификации, в т. ч. предполагающие применение «активной поверхности», мало что изменили – необходимые технологии конструирования термостабильного ферменного каркаса и панелей появились позже в процессе подготовки и реализации проекта 50-метрового телескопа LMT [13]. Даже построенный с применением этих технологий LMT, расположенный на высоте 4600 м, практически работает на волнах не короче 1 мм. Пределом возможности антенных технологий конца 70-х годов является 30-метровый телескоп IRAM, установленный на Пико-Велето (Испания) на высоте 2850 м – это единственный крупный телескоп диаметром более 15 м, который сегодня может удовлетворительно работать на волне 0.9 мм, а астроклимат его сайта, по нашим оценкам, существенно лучше астроклимата плато Суффа. Астроклимат Пико-Велето скорее сравним с астроклиматом Мауна-Кеа (Гавайи), в частности среднее значение PWV (осажденной воды) зимой там менее 2 мм, а ночью в январе-феврале – менее 1 мм, весной и осенью – менее 3 мм, и даже летом – менее 4 мм [14]. Как будет показано ниже это существенно лучше, чем может быть достигнуто на плато Суффа. На 30-метровом телескопе IRAM многолетними усилиями ведущих антенных специалистов мира, в т. ч. с помощью климатизации его ферменного каркаса и применения голографических методов антенных измерений, достигнута среднеквадратичная точность поверхности 55 мкм [15]. Точность поверхности, сравнимую с точностью 30-метрового телескопа IRAM, 62 мкм (СКО), планировали достичь на РТ-70 в Суффе [16], при том, что 30-метровый телескоп IRAM, в отличие от РТ-70, изначально был спроектирован для работы в мм/субмм диапазоне волн на основе опыта проектирования 15-метровых мм/субмм телескопов IRAM. Точность 15-метровой антенны IRAM после модернизации, в частности замены панелей и узлов их стыковки с ферменным каркасом, доведена до 35 мкм СКО. Эта антенна успешно используется в интерферометре NOEMA (12×15 м), в перспективе – для работы на волнах до 0.8 мм [17].

Даже если остаточная (неисправленная) негомологичность телескопа РТ-70 окажется приемлемой, что маловероятно при весьма значительных

отклонениях нового параболоида от исходного (до 65 мм на краях зеркала) и смещениях фокуса нового параболоида до 36 мм в радиальном направлении и до 30 мм в вертикальном, термические деформации поверхности РТ-70 могут достигать 1 мм [18]. Их устранение требует закрытия, вентиляции и климатизации предусмотренного исходным проектом ферменного каркаса при условии замены 1188 панелей РТ-70 на новые термостабильные и более точные. По нашим оценкам, циркулирующий в закрытом ферменном каркасе РТ-70 объем воздуха может составить 33000 м³, а необходимая скорость перемещения воздуха – 1100 м³/с, в то время как на 30-метровом телескопе IRAM эти параметры имеют значения 1800 м³ и 17.5 м³/с, а на специально спроектированной для вентилирования конструкции LMT – 7000 м³ и 50 м³/с [19]. От дорогостоящей вентиляции (даже не климатизации) огромного объема отказались на 64-метровом SRT (Сардиния, Италия), а вентилируемый объем РТ-70 должен быть в 1.5 раза больше. Масса ферменного каркаса 30-метрового телескопа IRAM, единственного крупного телескопа, где были решена задача, в 6 раз меньше, чем у РТ-70, перепады температур в районе плато Суффа (2400 м), а следовательно, и необходимые энергозатраты на вентиляцию (а тем более климатизацию) РТ-70 будут существенно выше, чем на уровне моря в Сардинии.

Заметим, что точность поверхности SRT, спроектированного для работы на волне до волны 2.6 мм в начале 2000-х годов, после активной коррекции поверхности в режиме «разомкнутого контура» с использованием фотограмметрии составила 300 мкм СКО [20] при существующих планах достижения точности 180 мкм СКО с использованием быстрой лазерной метрологии, голографии и работы системы контроля активной поверхности в режиме «замкнутого контура». Это безусловный предел и для РТ-70 в Суффе в самых благоприятных условиях (ночью с низкими перепадами температур), при том что точность поверхности РТ-70 в Евпатории, по нашим самым оптимистичным оценкам, не лучше 0.75-0.80 мм (СКО). Никакая «активная поверхность» ни при каких условиях не позволит повысить точность

поверхности радиотелескопа более чем на порядок и сохранить ее сколько-нибудь продолжительное время без принципиального изменения его конструкции, использования новейших технологий стабилизации ферменного каркаса, панелей, квадрупода и других элементов высокоточной антенны наряду с безусловно необходимым, но не достаточным применением «активной поверхности».

Нереалистичность планов в отношении РТ-70 в Суффe можно объяснить только отсутствием опыта строительства и эксплуатации крупных полноповоротных мм телескопов в РФ в последние полвека и непониманием всех проблем решения такой сложнейшей задачи. Авторы концепции мм/субмм РТ-70 ссылаются на успешный опыт строительства в конце 1970-х и начале 1980-х годов крупных полноповоротных инструментов коротковолнового см диапазона (РТ-70 в Евпатории и Уссурийске). Опыт строительства в СССР в 1960-х годах единственного крупного радиотелескопа, работавшего на волне 2.6 мм (РТ-22 в Кацивели, Крым) также был успешным. Следует, однако, иметь в виду, что точность поверхности РТ-22 в Крыму не превышает 0.25 мм СКО [21], а его апертурная эффективность по данным радиоастрономических наблюдений на волнах 3.9 мм и 2.25 мм не превышала 22% и 6% соответственно [22].

Значительный прогресс в развитии технологий построения субмм телескопов среднего класса произошел в период разработки и конструирования 12-метровых телескопов ALMA, и в настоящее время такие технологии развиваются для более крупного субмм телескопа диаметром 20-25 м [9]. Хорошо развитая замкнутая, термостойкая ферменная конструкция телескопа ALMA из высокомодульного армированного углеродным волокном полимера (CFRP) сохраняет свою форму при наклонах. Поверхность состоит из 120 ячеистых панелей сэндвич-структуры, изготовленных с использованием технологии высокоточной гальваноластики (электроформирования) никеля, образующих пять кольцевых поясов. Точность поверхности отдельной панели не хуже 8 мкм СКО, точность поверхности 12-метрового телескопа после

голографической юстировки не хуже 14 мкм СКО. Величина среднеквадратичных деформаций поверхности при изменении окружающей температуры составляет $0.8 \text{ мкм}/^\circ\text{C}$ [23] что может ухудшить точность поверхности до 18 мкм СКО при изменении окружающей температуры на 15°C в сравнении с окружающей температурой в процессе голографической юстировки поверхности.

В концепции проекта ESMT было предложено взять за основу конструкцию европейских антенн ALMA [9], увеличить диаметр антенны до максимально возможного без принципиальных изменений конструкции ферменного каркаса, дополнить ее «активной поверхностью» и третичной оптикой, в том числе, для работы на высоких частотах, адаптивной. Однако возможность масштабирования конструкции 12-метрового телескопа ALMA требовала дальнейшего изучения. Оптимальным целевым размером для масштабирования является диаметр главного зеркала 21 м. Механическое и тепловое моделирование, выполненное специалистами EIEGroup, показало, что 12-метровая антенна ALMA без существенных изменений конструкции телескопа может быть увеличена только до 15 м. В этом случае потеря эффективности антенны составляет менее 10% на краю поля зрения (0.18°) на длине волны 300 мкм. Для антенны диаметром 21 м требуется оптимизация конструкции, в том числе ее ферменного каркаса, панелей и приемной кабины [9]. В противном случае поле зрения 21-метрового телескопа следует уменьшить на 30% и более, чтобы сохранить потерю эффективности на том же уровне, что и в случае 15-метровой антенны на волне 300 мкм. Первый способ оптимизации – сохранить исходное относительное отверстие и увеличение телескопа ALMA, увеличив размер контррефлектора и соответствующим образом изменив его положение и коническую постоянную. В этом случае потеря эффективности не будет превышать 7% на краю поля зрения. Второй способ – использовать большее увеличение, при этом эффективное фокусное расстояние значительно возрастет. Однако увеличение оптической системы должно быть согласовано с размером физически доступного поля изображения,

поэтому в данном случае, по-видимому, потребуется уменьшение относительного отверстия с применением третичной оптики для исправления поля изображения от аберраций.

Конструкции панелей, как главного, так и вторичного зеркал и средств их регулировки, использованные в телескопе ALMA, могут быть сохранены без изменений, как и конструкция термометрических приборов и системы привода главных осей, но конструкция ферменного каркаса и приемной кабины изменится. Предварительные расчеты с применением метода конечных элементов (МКЭ) показывают, что смешанная конструкция фермы из стали или алюминия и углепластика будет лучшим выбором для ESMT. МКЭ дает ожидаемую погрешность поверхности и устанавливают требования к исполнительным элементам активной поверхности главного зеркала. В соответствии с расчетами, гравитационные деформации главного зеркала составляют 0.3 мм, включая некоторый запас, необходимый для достижения предварительной юстировки, с учетом ожидаемого допуска по тепловым деформациям.

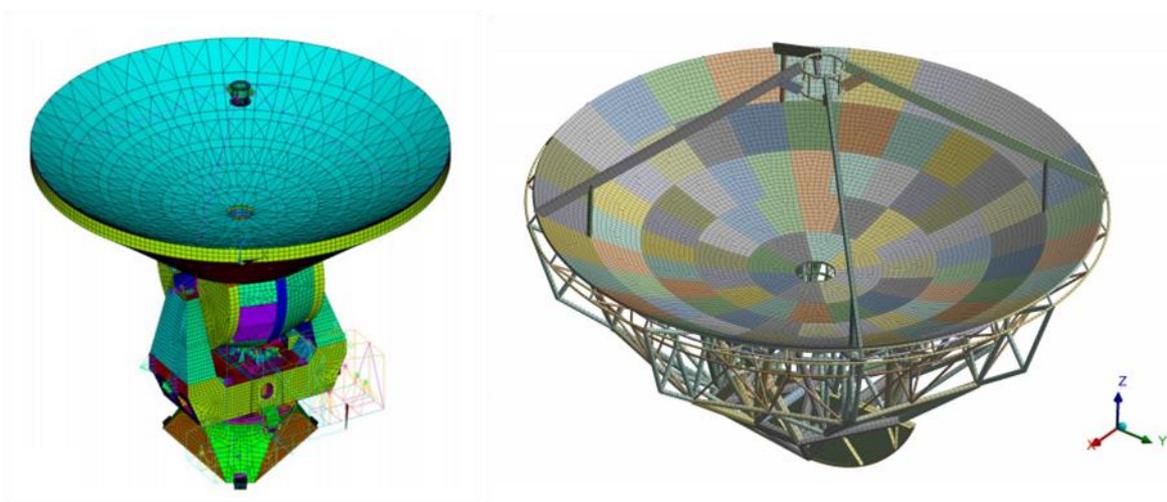


Рис. 1. Трехмерные модели 15-метрового телескопа типа ALMA и оптимизированного 21-метрового телескопа ESMT

Предлагаемая конструкция антенны ESMT включает 96 активных сегментов, управляемых 129 приводами. Каждый сегмент состоит из 4-6 плиток размером 500×500 мм, поддерживаемых рамой из алюминия или углепластика [9]. Это позволяет значительно сократить количество

необходимых приводов, упростить изготовление панелей, достичь более высокой точности поверхности и упростить настройку телескопа. Верхняя часть ферменного каркаса состоит из стоек из углепластика со стальными соединениями, а нижняя его часть состоит из стальных балок. Расчетная масса телескопа 45 т с учетом всех составляющих, включая активные сегменты (7 т) и квадрупод с контррефлектором (1.5 т). Предварительно оцененный ход привода панелей составляет ± 3 мм, что близко к ходу регулировочных винтов ALMA с ручным приводом, несмотря на значительное изменение диаметра главного зеркала и размеров всего телескопа. Трехмерные модели 15-метрового телескопа типа ALMA и оптимизированного 21-метрового телескопа приведены на рис. 1 [9].

Разработанный каркас главного зеркала ESMT представляет собой открытую ферму. Применение материала с невысоким коэффициентом теплового расширения, такого как CFRP, обеспечивает стабильность формы конструкции в широком диапазоне температур. Для достижения лучшего контроля температуры задняя сторона каркаса может быть закрыта несущими панелями, что дает возможность применить систему кондиционирования воздуха в полученном замкнутом объеме. В таком случае детали конфигурации и рабочего режима системы кондиционирования будут зависеть от условий окружающей среды на объекте и, следовательно, отличаться от объекта к объекту. В частности, для телескопа ESMT в Тибете для работы во всем субТГц диапазоне и на более высоких частотах ферменный каркас может быть закрытым и вентилируемым, а телескопы ESMT в Узбекистане и РФ могут иметь открытый ферменный каркас, что существенно дешевле в плане их обустройства и эксплуатации. Идентичность конструкции всех трех телескопов ESMT, за исключением открытости или закрытости их ферменного каркаса, обусловлена потребностью минимальной серийности инструмента для его изготовителя и возможностью методической работы с ним в более комфортных условиях в сравнении с высокогорным Тибетом.

Перспективные задачи мм/субмм астрономии требуют разработки нового поколения многоцветных приемных камер предельной чувствительности с большим количеством детекторов (10^4 - 10^5). Одной из наиболее перспективных технологий, подходящих для решения таких задач является архитектура детектора на кинетической индуктивности (KID) из-за ее высокой плотности мультиплексирования по сравнению с предыдущими архитектурами детекторов (TES) [10, 24]. Для согласования поля изображения телескопа с физическим размером широкоформатной матрицы KID применяют третичные зеркала, обычно в комбинации с квазиоптической линзой [25].

Основная задача активной оптики ESMT состоит в том, чтобы получить точность поверхности 30 мкм СКО в режиме «разомкнутого контура» с коррекцией деформаций антенны с помощью предвычислений и знания температур в 100 точках ферменного каркаса и точность поверхности 15-20 мкм СКО в режиме «замкнутого контура» с точной лазерной метрологией для контроля положения вспомогательного рефлектора и активных сегментов главного зеркала.

Для быстрого получения топографии ошибок поверхности телескопа ESMT при любом положении антенны и оперативного исправления ошибок поверхности предлагается использовать высокоточный лазерный трекер. В настоящее время на рынке представлен, например, трекер API Radian Pro с полусферическими светоотражателями и интерферометром с точностью измерения 5 мкм СКО на расстоянии 10 м. Для углов 96 активных сегментов главного зеркала при скорости измерения 2 точки в секунду и, с учетом времени перенацеливания, измерение положения всех светоотражателей займет 5-10 мин. Карта ошибок, содержащая 384 точки, будет использоваться для управления 129 приводами. Для измерения положения контррефлектора с пятью степенями свободы, а также для получения более подробной карты поверхности главного зеркала предложено использовать бесконтактный лазерный радар. Существующие приборы производства Nikon Metrology при специальном выборе из серии обеспечивают точность 25 мкм СКО на расстоянии 10 м,

скорость измерения 2-3 точки в секунду. Измерение трех точек на плитку, т. е. 12-18 точек на активный сегмент или 1152-1728 точек также займет 5-10 минут. Это позволит получить как координаты углов активных сегментов, так и карту каждого активного сегмента. Кроме того, эффективная точность бесконтактных измерений радара может быть выше номинальной, поскольку нас интересует взаимное расположение соседних плиток в пределах сегмента, т. е. измерения выполняются в одном направлении и в одной атмосфере, а возможность взаимного выравнивания активных сегментов предоставит лазерный трекер с встроенным интерферометром. Ранее лазерный трекер Leica применялся на LMT [26] в режиме юстировки неподвижного телескопа, а не для оперативного контроля деформаций поверхности в процессе его работы. Такие измерения и коррекции можно будет проводить на ESMT перед началом наблюдения (сопровождения) одиночного источника или картографирования заданной области неба. Число необходимых лазерных трекеров и радаров для решения данной задачи должно быть установлено экспериментально. Как показывает предварительное моделирование и опыт работы с лазерными трекерами и радаром [8, 27] для обеспечения минимального затенения панелей телескопа количество трекеров и радаров должно быть не менее 2-3, а оптимальным местом их установки являются основания ног квадрупода, поддерживающего вторичное зеркало телескопа.

Для независимых измерений ошибок взаимной привязки активных сегментов ESMT предложено применить быстрый голографический метод, в частности, метод записи трех голограмм с тремя фиксированными положениями опорного элемента (сегмента) [28]. Широкоформатные KID матрицы (10^4 и более пикселей) предельной чувствительности, которые могут эффективно работать на частоте выше 70 ГГц позволяют реализовать быструю голографию не только по наземному [28], но и по яркому космическому источнику на волне 4 мм (75 ГГц). В качестве источника космического сигнала в мм диапазоне для ESMT подходит планета Венера – самый яркий источник неба в этом диапазоне после Солнца и Луны. Оптимальный угловой размер Венеры в два раза больше минимального,

но менее полуширины ДН ESMT и составляет 20-40", при том что он может изменяться в диапазоне 10-66". В оптимальном случае расчетная плотность потока Венеры на длине волны 4 мм с учетом результатов измерений в работе [29] на более низких частотах (14.94 ГГц, 22.46 ГГц), квадратичного увеличения потока планеты с уменьшением длины волны, падения яркостной температуры Венеры в мм диапазоне в сравнении с коротким см диапазоном с 550-600 К до 300-350 К [30] составляет 900-3000 Ян, что дает ожидаемую антенную температуру Венеры на ESMT не менее 20-80 К. При флуктуационной чувствительности матричного приемника на базе KID не хуже $0.5 \text{ мК/Гц}^{1/2}$ на пиксель [10] и времени накопления сигнала $\tau = 16$ секунд ожидаемое отношение сигнал/шум в голограмме составит 51-58 дБ, что должно обеспечить точность восстановления ошибок поверхности ESMT с пространственным разрешением одного активного сегмента поверхности не хуже $\lambda/100$. Полный цикл измерения трех двумерных голограмм в трех фиксированных положениях опорного элемента займет не более 1-2 минут. Повышение отношения сигнал/шум за счет увеличения времени накопления τ ограничивается атмосферой и аномальным шумом приемника в наиболее простом и удобном режиме полной мощности. Так, при увеличении времени накопления сигнала еще в 4-8 раз повышения отношения сигнал/шум в 2-4 раза не произойдет, а скорость измерений снизится в 4-8 раз, и одно из главных достоинств метода – быстрота, в том числе в сравнении с последовательной лазерной метрологией, описанной выше, будет утеряно.

Использовать Венеру для антенных измерений ESMT можно до 75% дней в году, когда она видна ежедневно в вечернее и утреннее время. При дневном восхождении Венеры, когда она достаточно близко расположена к Солнцу, а также в периоды минимального и максимального сближения с Землей использовать Венеру для указанных задач не представляется возможным. Практически данный метод голографии с использованием Венеры оптимально применим минимум 1-2 месяца в году, максимум 3-4 месяца в зависимости от года, например, в 2021 г. это ноябрь-декабрь, в 2022 г. – март-апрель,

в 2023 г. – июнь-июль и октябрь-ноябрь, в 2024 г. – декабрь, в 2025 г. – январь-февраль и май-июнь, но и это представляет для нас значительный интерес, поскольку метод максимально приближен к режиму наблюдений и является важным независимым средством настройки телескопа и контроля состояния его поверхности. По нашим предварительным оценкам, среднеквадратичная точность голографических измерений ошибок поверхности ESMT, ожидаемая при измерениях по Венере на волне 4 мкм составляет от 50 мкм до 20 мкм в зависимости от ее углового размера и достигаемого отношения сигнал/шум. Несколько месяцев в году в качестве источника сигнала для голографических измерений вместо Венеры можно использовать планету Юпитер, угловой размер которого составляет 32-52", но его яркостная температура и поток на волне 4 мкм в 2-3 раза меньше, и можно ожидать, что достижимая точность голографических измерений будет не выше 80 мкм, что, тем не менее, может представлять интерес в начальной стадии юстировки и контроля поверхности ESMT. Кроме того, Юпитер в отличие от Венеры можно использовать для антенных измерений в наиболее стабильное время – ночью.

Использование трех независимых методов диагностики поверхности главного зеркала, один из которых (трекер) имеет встроенный интерферометр для калибровки и запас светоотражателей для их фиксации в любых контрольных точках поверхности, позволит избежать возможных систематических ошибок, добиться хорошего согласования результатов измерений различных методов и требуемой точности поверхности телескопа 15-20 мкм непосредственно перед наблюдением в заданное время и на заданной высоте наблюдаемого источника или области неба. При этом высокая механическая и температурная стабильность конструкции телескопа позволит сохранить достигнутую точность его поверхности в течение нескольких часов. Таким образом, активная оптика в предложенном варианте будет задействована не непрерывно, для чего недостаточно быстродействия существующих высокоточных измерительных систем, а в заданный момент времени для

последующих за ним наблюдений и потому является приближением активной оптики или квазиактивной оптикой.

2. Третичная оптика ESMT

В отличие от однолучевого телескопа ALMA с полем зрения менее $1'$, инструменты ESMT должны быть многолучевыми, многопиксельными и иметь поле зрения не менее $10'$, что, в свою очередь, требует разработки и установки третичной оптики для коррекции полевых аберраций (комы, кривизны поля, астигматизма, дисторсии) с размером третичных зеркал до 1 м. Более широкие поля зрения потребуют больших габаритов третичной, а также вторичной оптики и очень дорогих широкоформатных мозаичных приемных камер, что приведет к значительному удорожанию проекта. Важной задачей оптимизации оптической схемы (ОС) телескопа является согласование поля зрения с требуемым полем изображения телескопа с учетом достижимых размеров приемных матриц. Эта задача, как показало предварительное моделирование, наряду с уменьшением эквивалентного фокусного расстояния телескопа, может быть решена с помощью третичной оптики в составе двух асферических зеркал для волн длиннее 0.86 мм. Для волн короче 0.86 мм и дальнейшего снижения аберраций на краю поля зрения размером $10' \times 10'$ можно применить более сложную оптическую систему, например, с дополнительным асферическим зеркалом или корректирующей линзой из полимерного материала (полиметилпентен, ZEONEX и т. п.) или монокристаллического высокоомного кремния с полимерным просветляющим покрытием.

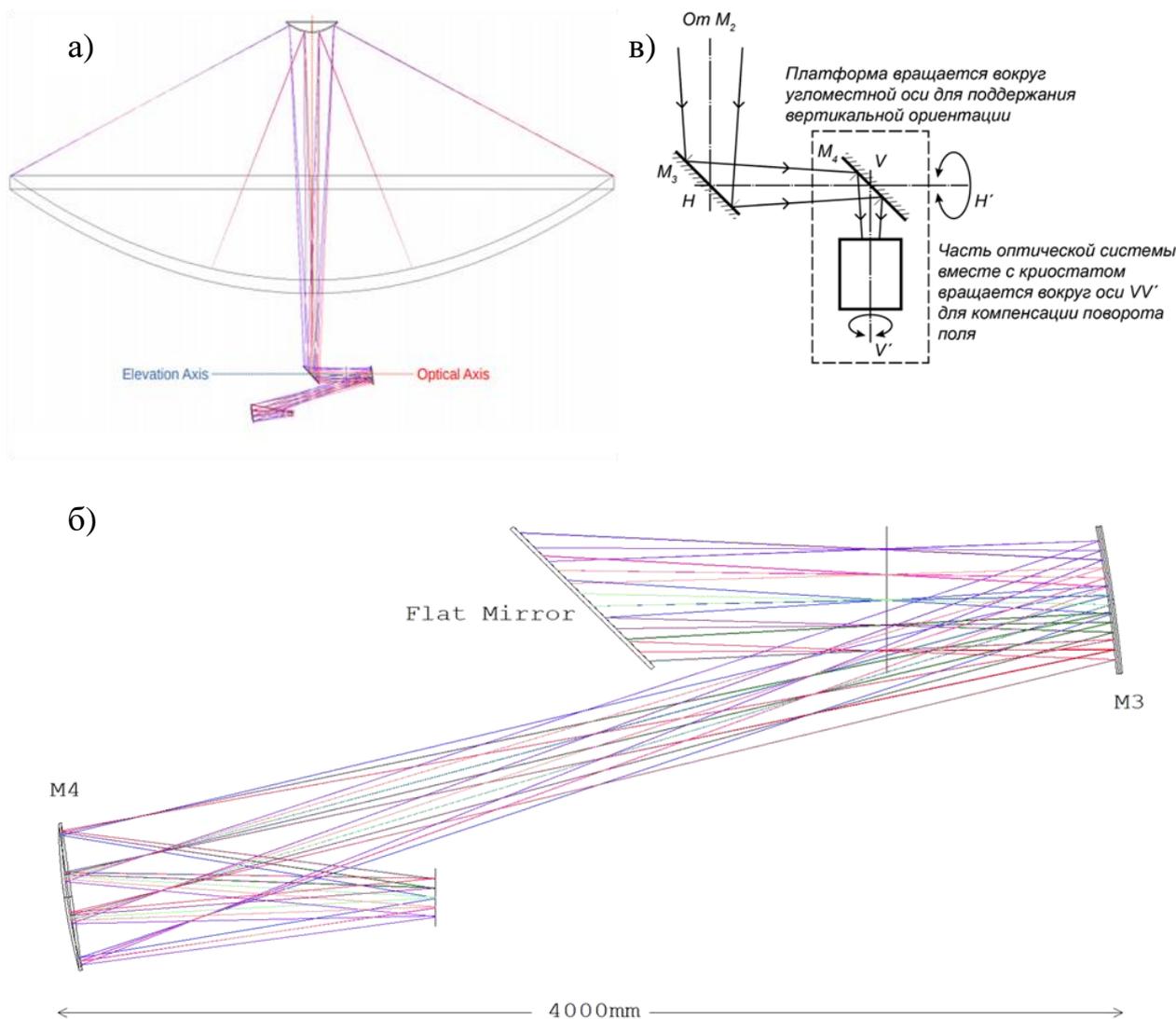


Рис. 2. Предлагаемые оптические схемы ESMT

Приемники ALMA охлаждаются до 4.2 К. При такой температуре еще можно использовать криосистему замкнутого цикла с газовой фазой Гиффорда – Мак-Магона, которая допускает наклон криосистемы, поэтому она может быть помещена в фокус Кассегрена. Датчики приемных камер на базе MKID [24] требуют гораздо более глубокого охлаждения (до 250 мК), что сегодня обеспечивает криостат растворения [8]. Однако такой криостат в стандартном, не специальном (космическом) исполнении может корректно работать только в положении, при котором его вертикальная ось не отклоняется на угол более 5° , что может быть достигнуто в фокусе кудэ, Нэсмита или их вариациях.

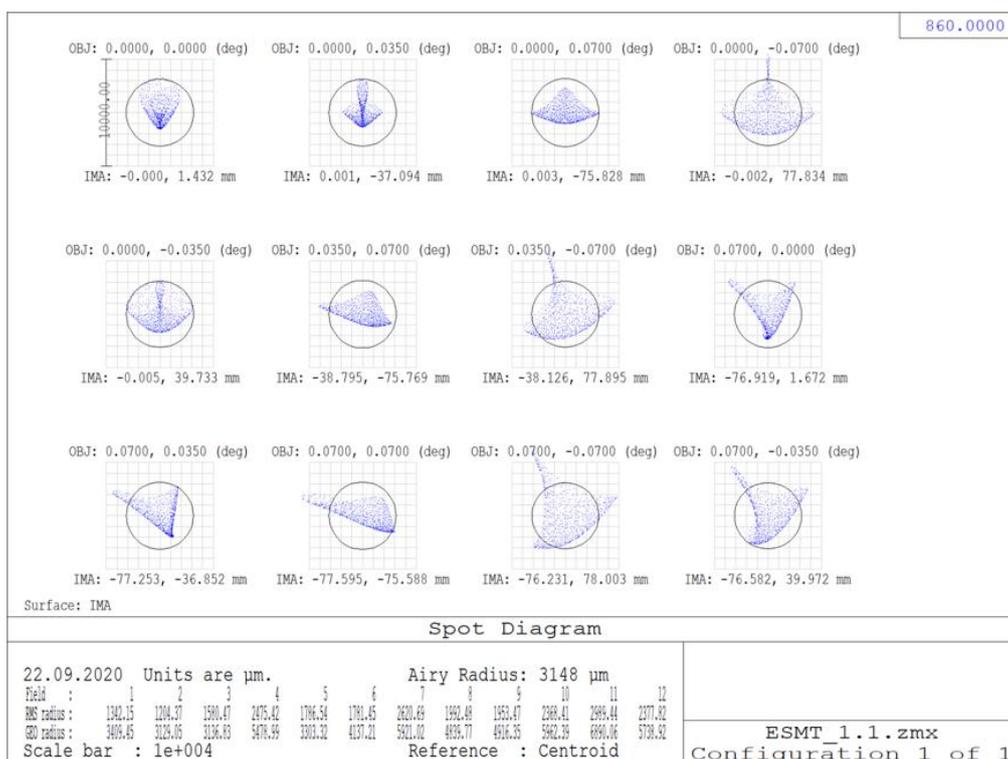


Рис. 3. Точечные диаграммы в поле зрения телескопа, соответствующем заданному полю изображения 150×150 мм

В работе [8] специалистами из ИНАСАН и САО РАН предложены две оригинальные ОС ESMT, в которых КС с приемной камерой в процессе наклона телескопа сохраняет вертикальное положение. Обе ОС используют фокус Нэсмита с оптимальным относительным отверстием 1:3 для согласования размеров МКID-камеры с полем изображения телескопа.

В первой ОС (рис. 2, а) приемная кабина находится на азимутальной вилке монтировки телескопа, в ней неподвижно установлены два асферических зеркала, первое из которых расположено после фокуса Нэсмита. Приемная кабина вращается вместе с вилкой вокруг азимутальной оси и неподвижна при перенаведении телескопа по углу места. Общий вид оптической схемы приемной кабины представлен на рис. 2, б. Зеркала М3 и М4 имеют тороидальную форму поверхности.

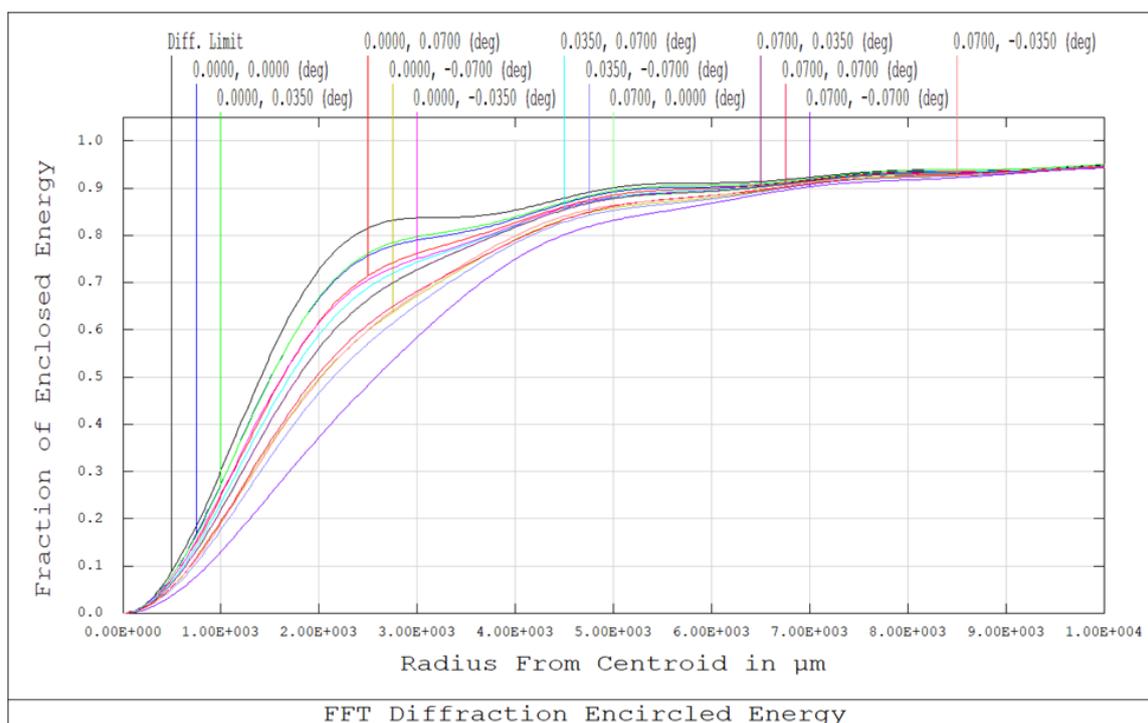


Рис. 4. Концентрация энергии на длине волны 0.86 мм в поле зрения телескопа для КИД-камеры, заполняющей поле изображения 150×150 мм

На рис. 3 и 4 представлены точечные диаграммы, число Штреля и концентрация энергии в поле зрения телескопа в варианте с двумя асферическими зеркалами. В системе с тремя асферическими зеркалами число Штреля на краю поля зрения диаметром $10'$ на той же длине волны может быть повышено до 0.9.

Во второй предложенной ОС (рис. 2, в) второе плоское зеркало, установленное на пути лучей в фокус Нэсмита, находится на единой платформе с третичной оптикой (асферическими зеркалами) и криостатом с приемной камерой. Платформа подвешивается на угломестной оси телескопа внутри приемной кабины, жестко связанной с главным зеркалом. При этом платформа сохраняет вертикальное положение под действием собственного веса или при помощи сервоприводов с инклинометрами. Вращение поля изображения при необходимости устраняется медленным вращением криостата с приемной камерой вокруг вертикальной оси. Изучение достоинств и недостатков обеих предложенных оптических схем в рамках подготовки проекта ESMT позволит сделать обоснованный выбор между ними или предложить лучшую схему.

Предложенная оптическая схема может быть модифицирована таким образом, чтобы вблизи зрачка можно было установить зеркальный planoидный корректор искажений волнового фронта, возникающих из-за крупномасштабных деформаций поверхности главного зеркала при наклонах телескопа и его термических деформаций при значительных перепадах окружающих температур (активная оптика) и из-за фазовых эффектов в атмосфере (адаптивная оптика). Активная фокальная оптика может потребоваться телескопу ESMT в районе Тибета для повышения его эффективности в диапазоне частот выше 1 ТГц. Этот вопрос требует дальнейшего изучения, поскольку достичь СКО поверхности 15 мкм телескопа диаметром 21 м, сохранить ее при наклонах инструмента и значительных перепадах окружающей температуры очень непросто. Для двух других телескопов ESMT достаточно эффективного применения системы квазиактивной оптики, описанной выше, а в диапазоне 0.86 мм – простейшей системы адаптивной оптики, описанной в п. 8.

3. Астроклиматические характеристики и условия для выбора сайта ESMT

Требования к астроклимату существенно зависят от диапазона длин волн, в котором будет работать оптический, ИК или радиотелескоп. Под астроклиматом сайта для субмм телескопа обычно понимают совокупность факторов, влияющих на качество радиоастрономических наблюдений, специфических атмосферных и окружающих сайт условий, определяющих пропускание атмосферы, возможную длительность наблюдений, и искажающих форму волнового фронта принимаемого излучения космических объектов. Рассмотрим специфические астроклиматические характеристики для выбора сайта ESMT.

1) Эффективность работы радиотелескопов существенно ограничивают искусственные радиопомехи. Ситуация в мм/субмм диапазонах пока не такая острая, как в см, и, тем более, в дм диапазонах, но развитие наземных и космических радаров, сетей 5G и 6G, спутниковых систем наземно-космической связи и наземной связи могут ограничить возможности наблюдений в большей

части мм диапазона вплоть до 4 мм и короче. В диапазоне около 7 мм сегодня активно внедряется наземно-космическая связь и работают наземные радиомосты (Q-band), 4-мм диапазон используется для радаров автомобильных систем предупреждения столкновений и более широкополосных радиомостов (E-band, до 86 ГГц). Диапазоны 40.5-42.5 ГГц и 84-86 ГГц выделены для радиовещательной спутниковой службы. Сложность состоит также в том, что от покрытия сайта средствами связи из космоса обычно не спасает его удаленность от крупных городских агломераций. В горных районах интенсивно развиваются горнолыжные и всесезонные рекреационные курорты, которые оперативно покрываются наземными и спутниковыми средствами связи, причем в режиме, как приема, так и передачи (down- and uplinks). Таким образом, выбрать свободную от возможных помех «спокойную» зону с достаточно развитой инфраструктурой сегодня уже не представляется возможным. Кроме того, размещение радиотелескопов в малодоступных районах требует очень высоких затрат на инфраструктурное развитие. Это стимулирует разработку и внедрение в диапазоне до 90 ГГц широкополосных цифровых спектроанализаторов, способных при необходимости в реальном времени на основе подходящих критериев и алгоритмов вырезать отдельные области спектра, в которых работают источники помех, попавшие в главный или боковые лепестки диаграммы направленности радиотелескопа. Поскольку это становится труднореализуемым или очень дорогим в многопиксельном режиме, уход в нем в частотный диапазон выше 100 ГГц, в котором квантовая эффективность работы самих болометрических приемных систем предельной чувствительности существенно повышается, является вполне оправданным.

2) Традиционной астроклиматической характеристикой сайта является количество ясных (безоблачных) дней/ночей в течение года. Для ее оценки часто используют среднюю годовую продолжительность солнечного сияния (ПСС), которая для горных астрономических обсерваторий обычно составляет не менее 2500 ч. Например, в Канарской обсерватории она составляет 3000 ч, в Ташкентской обсерватории – 2800 ч, в Бюраканской обсерватории – 3494 ч,

в Саянской солнечной обсерватории – 2464 ч, в Алма-Атинской – 2390 ч, в КРАО – 2279 ч, в ГАС ГАО и КГО – 2247 ч, в САО РАН – 2240 ч. Еще одной величиной, определяющей доступное наблюдательное время, является ТСС, изменяющаяся в диапазоне от 0 до 1, как и балльность облаков, но ТСС позволяет адекватно учесть статистику облачности в нужный период. Обычно места расположения оптических обсерваторий характеризуются в ночное время $TCC \leq 0.5$.

3) Астроклимат субмм сайта, в первую очередь, характеризуется радиопрозрачностью или пропусканием атмосферы, которое определяется спектром ее поглощения. В оптическом диапазоне потери из-за непрозрачности атмосферы составляют 25-50% по диапазону, а в горных районах (выше 2500-3000 м) не более 20%, хотя влияние поглощения в парах воды в оптике начинает проявляться в длинноволновом (красном) диапазоне, где имеется слабая линия поглощения (720 нм), дающая потери пропускания на уровне 5% при $PWV = 1$ см. В субмм диапазоне ситуация совсем иная и потери изменяются по диапазону в разы и на порядки при той же $PWV = 1$ см. Радиопрозрачность атмосферы повышается с высотой сайта из-за уменьшения концентрации кислорода и паров воды, а также из-за снижения коэффициентов удельного поглощения в кислороде и воде с высотой [31]. Спектр поглощения атмосферы в мм/субмм диапазоне включает, помимо десятков линий кислорода и паров воды, множество линий малых газовых составляющих, в частности, озона (215 линий), закиси азота (21), окиси азота (34), окиси углерода (5) и др. [32]. Интегральное поглощение в атмосфере и связанную с ним непрозрачность атмосферы (opacity) можно выразить через удельное поглощение и эффективные длины путей в основных компонентах поглощения (пары воды, кислород и гидрометеоры).

Таблица 1. Характеристики астроклимата лучших сайтов мира

Сайт	Высота, м	PWV 75%, мм	dPWV 75%, мм	dPWV/ PWV, %	T_{b0} (220 ГГц) 75%, К	dT_{b0} (220 ГГц) 75%, К
Южный полюс	2845	0.448	$1.5 \cdot 10^{-2}$	<4	13.61	$8.04 \cdot 10^{-2}$
Серро Чайнантор, Атакама	5612	1.439	$3.17 \cdot 10^{-1}$	22	23.27	3.89
Али 2, Тибет	6100	1.207	$3.21 \cdot 10^{-1}$	27	22.57	3.59
Саммит, Гренландия	3216	1.436	$1.56 \cdot 10^{-1}$	11	29.4	0.64

Осажденную воду (PWV) и изменчивость dPWV можно определить как интеграл от профиля удельной влажности по высоте или ее изменений. Согласно [33],

$$PWV = \frac{1}{\rho g} \int_0^{P_H} q dP,$$

$$dPWV = \frac{1}{\rho g} \left[\int_0^{P_H} (q_i - q_a)^2 P dP \right]^{1/2},$$

где ρ – плотность воздуха, g – ускорение свободного падения, q – удельная влажность воздуха как функция давления, $\Delta q = q_a - q_i$ – изменение удельной влажности, P – давление, P_H – приземное давление.

Величины dPWV, PWV, связанная с ними яркостная температура атмосферы T_{b0} и ее изменение dT_{b0} являются важными характеристиками астроклимата сайта субмм телескопа.

В табл. 1 приведены значения этих величин для лучших астрономических сайтов мира на частоте 220 ГГц по данным реанализа MERRA-2 [33]. Как видно из табл. 1, dPWV в зените не более 20-30% PWV, а $dT_{b0} < 20-30\%$. Обычно значимые изменения dPWV имеют место на масштабах более 0.5-1 часа и главным образом зависят от изменений профиля влажности, температуры, давления насыщенного пара, направления и скорости ветра. Следует учитывать,

что на реальных углах наблюдений $dPWV$ будут больше, поскольку толщина плоскослоистой атмосферы растет по секансному закону. Однако указанные изменения PWV происходят в наилучшее наблюдательное время суток не в середине дня (около 75% времени суток). В середине дня вариации PWV максимальны, а их характерные временные масштабы минимальны. Согласно [34], в наихудшие дневные часы ($-2\dots+3$ ч от полудня) вариации (флуктуации) PWV в Атакаме могут достигать 200-300% PWV с характерным временным масштабом ~ 1 мин.

Оценим возможности разновысотных сайтов с точки зрения пропускания атмосферы. Согласно закону Ламберта – Бера интенсивность прошедшего среду света (электромагнитной волны) падает в направлении z как

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\beta_a z} = e^{-\tau} = t(\lambda),$$

где β_a – коэффициент поглощения с размерностью обратной высоты, $t(\lambda)$ – пропускание атмосферы, в общем случае для переменного коэффициента поглощения среды ее оптическая толщина τ в неперах равна

$$\tau = \int_0^z \beta_a(z) dz = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right).$$

Для $\tau = 0.1/0.5/1$ Нп $t = 0.9/0.60/0.37$. Оптическая толщина ясной атмосферы может быть найдена как [31]

$$\tau(f, h, PWV) = \alpha(f) e^{-h/h_0} + \beta(f, h) PWV(h),$$

где α , β – коэффициенты удельного поглощения в кислороде и парах воды, h_0 – характеристическая высота кислорода (около 5 км). Зависимости удельных коэффициентов поглощения от высоты на частоте 225 ГГц, рассчитанные по модели НИТ/Pardo для зимы [31], приведены на рис. 5. Полученное с их помощью пропускание ясной атмосферы $t(\lambda)$ приведено в табл. 2.

Как видно из табл. 2, на частоте 225 ГГц пропускание атмосферы еще приемлемо и составляет не менее 75-60% для высоты 2000 м и $PWV = 5-10$ мм, в следующем окне прозрачности на частоте 345 ГГц оно падает в 3-4 раза и составляет для тех же PWV не более 20-25% [35].

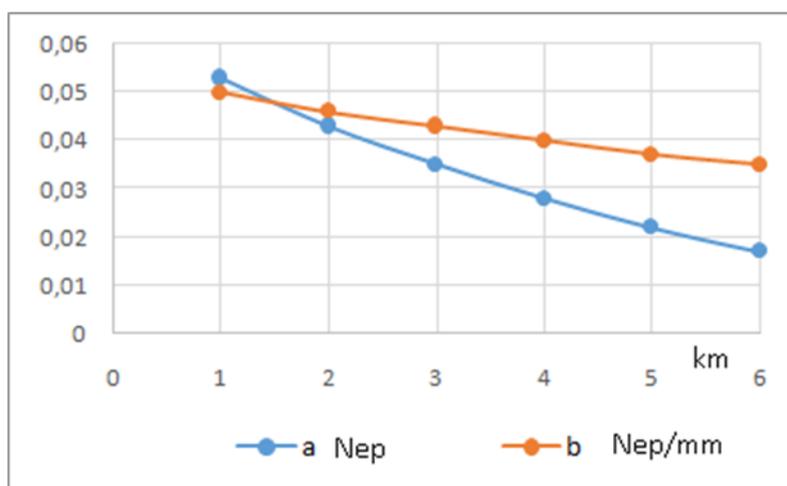


Рис. 5. Зависимость удельных коэффициентов поглощения от высоты на частоте 225 ГГц, рассчитанная по модели НИТ/Pardo [31]

Табл. 2 отражает уменьшение пропускания $t(\lambda)$ с высотой из-за уменьшения с высотой удельных коэффициентов поглощения. Но PWV также зависит от высоты и экспоненциально уменьшается по мере ее увеличения, по крайней мере, для данного района от долины к вершине горы [36]. Для разных районов и сайтов зависимость от высоты может быть более сложной, поскольку у них разная характеристическая высота паров воды H_0 в зените, на которой влажность воздуха падает в e раз, что нужно учитывать при сравнении. Согласно работе [37], для равнины $H_0 = 1.8-2.2$ км в зависимости от метеоусловий и сезона. Еще более сложная ситуация возникает в случае высокогорного плато, где H_0 уменьшается, но ее относительные сезонные вариации обычно возрастают. Как показано в [38], экспоненциальный закон изменения PWV с высотой,

$$PWV = PWV_0 e^{-\Delta H/H_0},$$

там также работает по крайней мере для близко расположенных (в пределах 8 км) сайтов, но он использовался для изменений ΔH в пределах ~ 500 м (от 5080 м до 5612 м), и с его помощью удалось найти H_0 на исследуемых сайтах. В частности, для сайта СВИ (Cerro Chajnantor plateau, 5080 м) получено $H_0 = 1379$ м, для сайта АРЕХ (Cerro Chajnantor plateau, 5080 м) – $H_0 = 1308$ м, для сайта ССАТ (Cerro Chajnantor, 5612 м) для третьего и первого кварталов года $H_0 = 1280$ м и $H_0 = 820$ м, соответственно [39]. Тем не менее, падение PWV с высотой на разных удаленных сайтах, как правило, также существенное, хотя другие

факторы, такие как специфический горный микроклимат, могут скомпенсировать высотный эффект. Зимой высотный фактор работает лучше, поскольку к нему добавляются низкие температуры воздуха в горах, при которых конденсируется водяной пар.

Таблица 2. Пропускание ясной атмосферы $t(\lambda)$

$H, \text{ м}$ \diagdown PWV, мм	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20
0	91.1	88.7	84.1	70.7	54.6	31.8
1000	92.4	90.2	85.8	73.8	57.5	34.9
2000	93.6	91.5	87.4	76.1	60.5	38.2
3000	94.4	92.5	88.6	77.8	62.8	40.8
4000	95.3	93.3	87.9	79.6	65.1	43.7
5000	96.3	94.3	90.8	81.3	67.5	46.6
6000	96.6	94.9	91.6	82.5	69.2	48.8

4) Важнейшей астроклиматической характеристикой субмм сайта является качество получаемых на нем изображений, которое определяется, в первую очередь, фазовыми эффектами в турбулентной атмосфере. Основными фазовыми эффектами является размывание изображений, вызванное мелкомасштабной турбулентностью, и дрожание изображений, вызванное более крупномасштабными эффектами, в частности, приводящими к общим наклонам волнового фронта. Фазовые эффекты напрямую не зависят от высоты сайта и больше определяются подстилающей поверхностью, восходящими потоками воздуха от земли, скоростью и направлением ветра, инверсией температуры и др. Даже при высокой прозрачности или пропускании атмосферы качество оптических и радиоизображений часто определяется другими местными условиями. Так, медианное качество оптических изображений 2.5-метрового телескопа КГО на горе Шатджатмаз (2096 м) в районе Кисловодска – 0.92", БТА на склоне горы Пастухова (2070 м) и Цейсс-2000 в Терсколе (3100 м) – 1.2", в Саянах (2006 м) – 1.9". В оптическом диапазоне влияние паров воды на преломляющие свет свойства атмосферы минимально, однако субмм волны к

ней особо чувствительны как в плане пропускания, так и с точки зрения турбулентности. При высоком пропускании атмосферы интенсивность турбулентности может быть значительной, и наоборот. И то, и другое главным образом обусловлено содержанием воды в атмосфере, но пропускание определяется абсолютной величиной PWV, а турбулентность связана с эффектами преломления, рассеяния и отражения, неоднородностью распределения паров воды в атмосфере, приводящей к флуктуациям длин путей радиоволн, наклонам и искажениям волнового фронта. Опишем два подхода к качеству изображений субмм телескопа: радиофизический и оптический. Будущие эксперименты должны показать какой из двух подходов наиболее эффективен, или они могут дополнять друг друга в субмм диапазоне волн.

3.1. Радиофизический подход

В приложении 1 приведен радиофизический подход, использующий структурные функции радиоизлучения атмосферы для анализа влияния турбулентности атмосферы на данные наблюдений радиотелескопа в см и мм диапазоне волн [40, 41].

Для измерения структурной функции радиоизлучения атмосферы на разных сайтах можно использовать радиометр в линии поглощения паров воды и вне ее (22.235 ГГц и 35 ГГц) с большими оптимальными рупорами, у которых потери эффективности в данном диапазоне невелики. При этом будут измеряться только крупномасштабные флуктуации излучения и вызывающая их крупномасштабная турбулентность, но по ним с помощью модели, профилей температуры и влажности, полученной с использованием реанализа ERA-5, результатов измерения мелкомасштабной оптической турбулентности (о которых речь пойдет ниже) можно восстановить картину атмосферной турбулентности в целом. Задача коррекции фаз в реальном масштабе времени, т. е. фактически задача адаптивной оптики, решается сегодня на ALMA с помощью атмосферных радиометров (WVR), размещенных на каждом из 66 телескопов, что позволяет существенно улучшить качество изображений [12].

С этой целью используется WVR в линии паров воды 183 ГГц [42]. Разность длин путей или фаз антенн можно определить, измеряя излучение молекул воды в направлении, близком к наблюдаемому источнику, в центре и на склоне линии поглощения, вычисляя фазовую ошибку по разнице в количествах водяного пара на пути к отдельным антеннам [43].

3.2. Квазиоптический подход

Качество изображений в оптике принято характеризовать астрономической видимостью (seeing) и оценивать параметром r_0 [см], либо параметром, пропорциональным, λ/r_0 ["], где λ – длина волны регистрируемого излучения, r_0 – радиус Фрида. Параметр r_0 был введен для численной оценки уровня искажений волнового фронта излучения, распространяющегося в турбулентной атмосфере и возможности их исправления методами АО. Значения радиуса Фрида определяется следующим соотношением [44]:

$$\frac{1}{r_0^{5/3}} = 0.423 \frac{2\pi}{\lambda} \sec z \int_0^{H_{\max}} C_n^2(h) dh,$$

где z – зенитный угол наблюдения, $C_n^2(h)$ – высотная модель эволюции структурной постоянной показателя преломления атмосферы, h – текущая высота над подстилающей поверхностью, H_{\max} – верхняя граница оптически активной атмосферы. Радиус Фрида зависит от длины волны регистрируемого излучения как $r_0 \propto \lambda^{6/5}$ и определяется набором неоднородностей показателя преломления воздуха от земной поверхности до верхней границы турбулентной атмосферы. По физическому смыслу он эквивалентен диаметру телескопа, имеющего дифракционный предел полуширины изображения λ/r_0 , которое соответствует изображению, создаваемому атмосферой при наблюдении точечного источника идеальным телескопом с бесконечным размером зеркала. Значения радиуса Фрида, определенных по данным наблюдений астрономических источников света, чаще всего варьирует в пределах 5-20 см для видимого диапазона.

4. Радиоастрономические методы подавления флуктуаций атмосферы

Эффективная толщина слоя атмосферы, ответственного за турбулентные фазовые флуктуации, составляет 1-2 км. Характеристики эффективного турбулентного слоя могут существенно изменяться во времени и пространстве. Сильно турбулентным является приземный слой атмосферы ~50 м [45]. По данным [46], днем турбулентный (пограничный) слой обычно лежит в диапазоне высот от 0.5 км до 2.5 км со средним значением высоты 1.5 км. Для радиотелескопа наиболее опасны крупномасштабные неоднородности атмосферы, в которых сосредоточена основная доля энергии турбулентности, и которые ассоциируются с низкими частотами. Однако необходимо также иметь информацию о мелкомасштабных флуктуациях, больших, чем внутренний масштаб. Внутренний масштаб турбулентности составляет $l_0 = 1-10$ мм, его вариации оказывают слабое влияние на фазовые характеристики. Внешний масштаб турбулентности L_0 , ассоциируемый с крупными «энергонесущими» турбулентными компонентами, обычно находится в диапазоне от 10 до 100 м. В работе [46] приводится график среднего квадрата флуктуаций электрической толщи атмосферы $\sigma(\Delta t)$, где $\sigma(1 \text{ с}) = 10$ мкм, $\sigma(10 \text{ с}) = 100$ мкм, $\sigma(100 \text{ с}) = 1000$ мкм, т. е. временной масштаб 1 с и более как раз соответствует нашему случаю, поскольку точность поверхности ESMT должна быть лучше 20 мкм СКО, что соответствует среднеквадратичному отклонению волнового фронта от плоскости ~10 мкм.

Теперь на примере метода опорного объекта покажем, как можно использовать анализ структурных функций флуктуаций эйконала атмосферы (см. приложение) не только для изучения, но и для коррекции фазовых флуктуаций, по крайней мере, крупномасштабных, которые являются в нашем случае определяющими. Быстрое переключение антенн интерферометра или луча одного радиотелескопа с наблюдаемого объекта на опорный дает возможность отфильтровать низкочастотные флуктуации фазы, вносимые атмосферой. Это, в свою очередь, позволяет снизить неопределенность ориентации электрической оси диаграммы направленности радиотелескопа

относительно волнового фронта, возникающую вследствие изменений угла прихода волн и наклона волнового фронта. При одновременном или почти одновременном приеме сигналов исследуемого и опорного объектов, отстоящих друг от друга на угол ΔA , тропосферная дисперсия разности фаз на элементах интерферометра (краях сплошной апертуры) равна

$$\sigma_{\Delta A}^2 = D_{\psi}(\Delta \rho),$$

где $\Delta \rho \approx \Delta A \cdot H$, H – эффективная высота неоднородностей (~ 3 км). Чем меньше ΔA , тем меньше размер неоднородностей, флуктуации фазы на которых будут приводить к ошибкам, и тем меньше дисперсия фазы $\sigma_{\Delta A}^2$. Вид и значения структурной функции $D_I(\Delta \rho)$ (закон «5/3» и «2/3») можно получить из наблюдений излучения атмосферы на данном радиотелескопе. Метод опорного объекта предложен в работе [46]. Он теоретически позволяет реализовать предельное разрешение интерферометра, определяемое его базой (или диаметром апертуры в случае одиночного телескопа) b :

$$\theta_{\min} \sim \lambda/b.$$

Минимальная длина волны в методе:

$$\lambda_{\min} = 5\sigma_{\Delta A} = 5\sqrt{D_{\psi}(\Delta \rho)}.$$

При временной фильтрации телескоп последовательно регистрирует сигналы излучаемого и опорного объекта. Если разность моментов прохождения составляет Δt , то дисперсия флуктуаций фазы будет равна

$$\sigma_{\Delta A}^2 = D_{\psi}(\Delta t).$$

Интерполируя и экстраполируя результаты работы [46], приведем в табл. 3 оценки необходимых ΔA и Δt при использовании метода опорного объекта для интересующих нас длин волн. Эти оценки будут верны для любого размера базы (или диаметра апертуры) b , от которого будет зависеть только достигаемое в результате использования метода предельное разрешение инструмента и то, какие пространственные частоты им будут выделяться: b/λ для двухэлементного интерферометра или от 0 до b/λ для одиночного телескопа.

Табл. 3 характеризует возможности временной и пространственной фильтрации, выполняемой данным методом. Если задаться пространственным масштабом ΔA , получим временную фильтрацию масштаба Δt , если задаться временным масштабом Δt , получим пространственную фильтрацию масштаба ΔA . Пространственная фильтрация осуществляется данным методом при одновременном сопровождении двух объектов (исследуемого и опорного), когда крупномасштабные систематические фазовые ошибки (превосходящие ΔA) устраняются из записи. Временная фильтрация выполняется данным методом сравнением моментов прохождения исследуемого и опорного объектов, когда крупномасштабные временные ошибки моментов прохождения (превосходящие Δt) устраняются.

Таблица 3

$\Delta A, ^\circ$	$\lambda_{\min}, \text{мм}$	$\Delta t, \text{с}$	$\theta_{\min}, ''$
20	8	~120	~60
6	3	~30	~30
0.6	0.5	~3	~5
0.25	0.2	~1	~2

К сожалению, возможности рассмотренного метода сильно ограничены в мм/субмм диапазонах волн несколькими десятками самых ярких квазаров и УСН областей в качестве опорных объектов, что связано с необходимым требованием к отношению сигнал/шум для опорного объекта (более 15 дБ) и высокой шумовой температурой антенны и атмосферы в этих диапазонах, не позволяющих реализовать необходимую чувствительность телескопа по потоку и требуемое отношение сигнал/шум даже с приемными камерами предельной чувствительности. Тем не менее, *метод опорного объекта* может успешно применяться для контроля эффективности работы других методов, в частности, адаптивной оптики, и их отладки по ограниченному числу опорных объектов. Найти подходящий опорный объект рядом с исследуемым обычно не удастся, но можно найти «исследуемый» объект рядом с опорным, и с его помощью тестировать метод АО.

Астрономические наблюдения наземных телескопов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн сильно портятся из-за турбулентности атмосферы. Это особенно актуально для широкополосных высокочувствительных детекторов, таких как криоболометры. Чтобы вычлесть атмосферный вклад из измерений, двухлучевые методы используются уже много лет.

Наряду с *методом опорного объекта* широкое распространение получило использование качающегося вторичного зеркала (*wobbling*), которое попеременно направляет луч на две соседние области неба. В дополнение к формированию двойного луча, колебание зеркала имеет вторую функцию: исследуемый сигнал модулируется с частотой качания, что позволяет применять метод фазочувствительной демодуляции. В синхронно детектированном выходном сигнале телескопа пространственные и временные флуктуации атмосферы в значительной степени подавляются. Одновременно снижается $1/f$ -шум приемника. С момента появления алгоритма ЕКН [47] этот метод применяется даже для источников, размер которых во много раз больше расстояния между лучами. *Двухлучевой метод* вместе с интегрированием сигнала по фазам и алгоритмом восстановления широко используется в качестве стандартной процедуры для непрерывного картографирования космических источников в мм и субмм диапазонах. Первоначально предложенный для однопиксельного режима, этот метод сегодня используется и для больших матриц. Несмотря на эффективность такой техники, качающееся вторичное зеркало имеет несколько основных недостатков. Создание быстро и точно перемещающегося зеркала – довольно сложная техническая задача, особенно для больших телескопов и больших контррефлекторов, поэтому редко удается достичь частоты модуляции более 1-2 Гц, а этого может быть недостаточно для борьбы с $1/f$ -шумом и оптимальной работы считывающей электроники. Вторичное зеркало обычно допускает только определенное направление движения, которое ограничивает систему координат режимов наблюдения. Кроме того, небольшая асимметрия колебаний может привести к большим

смещениям из-за разных оптических путей для каждого луча. В работах [48, 49] предложена техника *fastscanning* (FS), не требующая качания контррефлектора. Она использует тот факт, что в матрицах детекторов все лучи одновременно и похожим образом подвергаются атмосферным воздействиям. Во время сбора и обработки данных атмосферный вклад удаляется корреляционным анализом сигналов детекторов. FS является существенно более гибким методом, чем метод двойного луча, при его использовании обычно требуется меньше времени для картографирования той же области неба. Для того чтобы подавить $1/f$ -шум, сам телескоп быстро сканирует (вибрирует) в пределах небольшого угла в процессе сопровождения или картографирования источника. Цена этих преимуществ – значительный объем памяти компьютера и вычислительной мощности, которые в настоящее время не являются сильным ограничением.

Все способы лучевого сканирования или постдетекторной обработки одних пикселей с помощью других приводят к увеличению шума и уменьшают достижимую чувствительность телескопа по потоку, и только метод АО позволяет бороться с влиянием атмосферы без снижения чувствительности телескопа. Кроме того, при его применении существенно упрощается обработка астрономического сигнала – он выходит из телескопа уже готовым к использованию и не зависит от применяемых для этого алгоритмов обработки. С $1/f$ -шумом, тем не менее, и в этом случае нужно бороться, например, применением высокочувствительных многопиксельных приемных камер, где в системе считывания используется общий для всех каналов широкополосный МШУ с частотным мультиплексированием сигналов детекторов, что снижает некоррелированный аномальный шум каналов в условиях предельно низких тепловых шумов [24].

5. Поиск возможных мест размещения ESMT

Исследования астроклимата, направленные на выбор подходящей евразийской площадки для нового мм/субмм телескопа, начались, точнее, активизировались в 2012 г. [1]. Необходимой, но недостаточной, как мы видели,

астроклиматической характеристикой для выбора сайта являются радиопрозрачность или пропускание атмосферы в субТГц диапазоне, что определяется главным образом величиной PWV и ее сезонными изменениями. Измерения в [1] выполняются с помощью прибора МИАП-2 на 100 ГГц и 150 ГГц [50] с использованием метода калибровки кривой наклона (метода атмосферных разрезов), который позволяет определить интегральное поглощение и от него перейти к PWV через удельный коэффициент поглощения β . Коэффициент β можно рассчитать, например, по модели МРМ Liebe или Moliere с использованием измеренных атмосферных профилей или измерить в эксперименте, построив зависимость τ от PWV , где τ находится радиометрическим методом, а PWV берется из независимых измерений двумя способами с помощью GNSS метода и солнечного спектрофотометра в линии поглощения паров воды 0.94 мкм .

Радиометрические измерения, выполненные с помощью МИАП-1 и МИАП-2 показали, что значения PWV 5 мм и менее достигается на площадках БТА (2070 м) и Суффа (2400 м) 20% и 45% времени в основном в осенне-зимний период [1, 51]. PWV обсерватории «Пик Терскол» (3100 м) заметно ниже, чем в районе БТА, но только в ясные дни, однако по количеству ясных дней и облачности обе площадки близки, несмотря на разницу высот более 1000 м. Радиометрические измерения PWV с МИАП-2 проводились на хребте Аркасара (Архыз, 2839 м), на Гара-Баши (Эльбрус, 3847 м) и выше и планируются на плато Абишира-Ахуба (3016 м, 36 км от БТА).

Радиометрические измерения PWV на данном сайте – необходимый шаг астроклиматических исследований. Тем не менее, ввиду трудоемкости и длительности таких измерений для сравнения ряда сайтов и необходимости обеспечения статистически репрезентативных оценок PWV за длительные промежутки времени мы использовали данные современных архивов реанализа ERA-Interim и ERA-5.

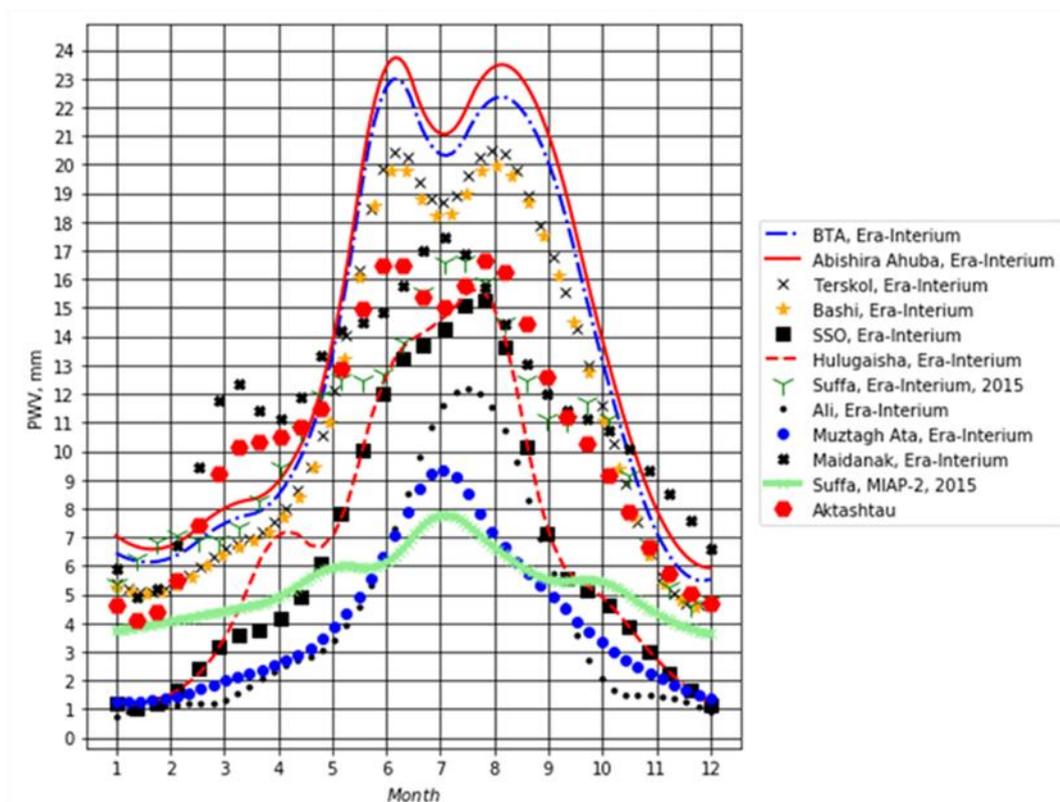


Рис. 6. Изменения PWV по месяцам для различных сайтов

На рис. 6 представлены неприведенные изменения медианных значений PWV по месяцам для разных практически интересных сайтов Северного Кавказа, Саян и Суффы, а также китайского Тибета и Памира, полученные по данным архива реанализа ERA-Interim. К сожалению, несмотря на достаточно высокое пространственное разрешение, доступное для реанализа, отсутствие данных прямых измерений приводит к существенным ошибкам в используемых ассимилированных данных Era, особенно в горных регионах. В этой связи при расчете PWV на вершинах гор мы использовали формулу [36]

$$PWV = F \cdot PWV_0 e^{K\delta z/1000},$$

где PWV_0 – расчетное значение PWV в узле сетки, K – коэффициент, равный 0.439, δz – перепад высот между абсолютной высотой сайта и высотой подножья (высотой ближайшей метеостанции), F – поправочный коэффициент, определяемый по результатам сравнения оценок средних величин PWV архива реанализа и данных ближайшей метеостанции.

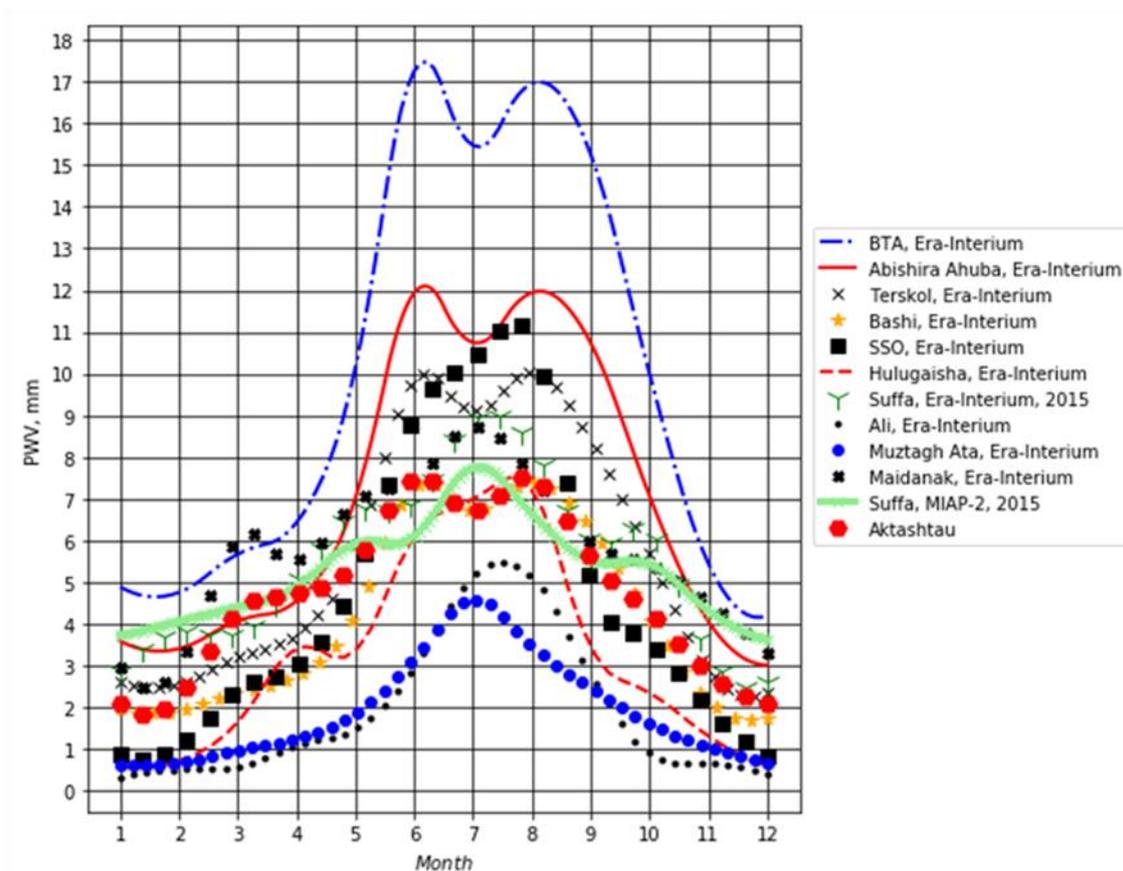


Рис. 7. Изменения значений PWV, приведенных к высоте вершины, по месяцам для различных сайтов

На рис. 7 показаны изменения PWV, приведенные к высоте вершины, по месяцам для ряда сайтов, представляющих практический интерес для ESMT. Анализ изменений значений PWV показывает, что не только китайские сайты, но и сайты Саян, а также Акташтау и Баши по своим возможностям в наилучшее для наблюдений время зимой существенно превосходят Суффу – место незаконченного строительства РТ-70. Устойчиво низкие температуры в Саянах приводят к «вымораживанию» воздуха и очень низким значениям PWV в долгий зимний период, что вплотную приближает их к существенно более высотным сайтам Тибета и Памира. В летние месяцы Суффа и другие сайты РФ малопригодны, а сайты КНР ограниченно пригодны для наблюдений в мм/субмм диапазоне. Приводимые оценки PWV также существенно отличаются по величине от средних по рассматриваемой территории, поскольку привязаны к рельефу относительно местных метеостанций. Полученные медианные значения

PWV ночью для ряда рассмотренных нами сайтов, а также сайта ALMA приведены в табл. 4.

Для анализа dPWV мы использовали архив ERA-5 с доступными данными с часовым разрешением за период с 2009 по 2019 г. Мы также выбрали временные интервалы в течение суток с 00 по 06 ч местного времени (ночной период) и с 12 по 18 ч (дневной период). Полученные значения dPWV не характеризуют в полной мере мелкомасштабную изменчивость PWV. На средние величины dPWV большое влияние оказывают низкочастотные составляющие изменений PWV, в том числе характер суточных изменений осажденного водяного пара, обусловленных вертикальными профилями влажности воздуха. Влияние низкочастотных составляющих на dPWV приводит к тому, что значения dPWV слабо отличаются от дня к ночи. Для отдельных пунктов значения dPWV в мм и % в период с 2009 по 2019 г. приведены в табл. 5. Как видно из табл. 5, абсолютные значения dPWV мало зависят от высоты сайта и времени года и больше определяются спецификой астроклимата, а относительные флуктуации заметно падают летом из-за увеличения значений PWV в теплое время года. Низкие относительные значения dPWV для сайтов с разным PWV отражают скорее высокие PWV, чем низкие dPWV и, как мы видим, не являются показателем хороших сайтов. Поэтому относительные значения dPWV больше подходят для сравнения близкорасположенных сайтов, а абсолютные значения позволяют сравнивать по этому показателю любые сайты, представляющие практический интерес, но более продуктивно сравнивать сайты по dPWV с близкими PWV.

По данным реанализа, рассмотренные выше сайты западного Северного Кавказа имеют в ночное время медиану TCC от 0.63 до 0.75 зимой и от 0.5 до 0.56 летом [35]. Доля облачности среднего и верхнего ярусов (при расположении сайта выше 2000 м) изменяется от 0.46 до 0.51 зимой и от 0.24 до 0.32 летом. Однако не всегда нижний ярус облачности можно не учитывать, поскольку это требует локального изучения TCC, например, с помощью камеры полного неба. Существенно лучшие TCC достигаются в восточной части

Северного Кавказа, а именно в горном Дагестане (например, гора Хорай в Рутульском районе), где медиана ТСС может быть менее 0.4 зимой и менее 0.25 летом. В месте расположения Саянской солнечной обсерватории средние оценки доли общей облачности хуже, ТСС изменяется от 0.45 в зимний период до 0.6 в летний период. Существенно более низкие значения ТСС достигаются на плато Суффа весной и летом (менее 0.2), но летом значительные PWV не позволяет выполнять эффективные наблюдения на плато Суффа на волнах короче 2 мм, равно как и на Северном Кавказе. Для сравнения сайт ALMA по данным реанализа имеет ТСС = 0.11 зимой и ТСС = 0.39 летом.

Таблица 4

Сайт	Высота, м	PWV, мм		Примечание
		Зима	Лето	
Суффа, Узбекистан	2500	2.7	8.7	2018 г. ночи
Майданак, Узбекистан	2650	3.4	8.7	2018 г. ночи
БТА, Нижний Архыз, РФ	2100	4.0	14.4	2018 г. ночи
Гора Пастухова	2736	3.7	13.2	2018 г. ночи
Грузинский холм	2400	3.9	14.2	2018 г. ночи
РАТАН-600	970	6.2	21.3	2018 г. ночи
Абишира-Ахуба, Архыз, РФ	3016	2.1	6.7	2018 г. ночи
Габулучат (Аркасара), Архыз, РФ	3005	3.4	11.2	2018 г. ночи
Терскол, Эльбрус, РФ	3100	1.85	6.7	2018 г. ночи
Гара-Баши, Эльбрус, РФ	3847	1.8	5.9	2018 г. ночи
Гора Хорай, Дагестан, РФ	3521	1.5	6.9	2018 г. ночи
Монды, Саяны, РФ	2006	0.9	10.0	2018 г. ночи
Пик Хулугайша, Саяны, РФ	3000	0.6	6.8	2018 г. ночи
Али 1, Тибет, КНР	5100	0.4	4.4	2018 г. ночи
Музтаг-Ата, Памир, КНР	4536	0.7	3.7	2018 г. ночи
Акташтау, Узбекистан	3383	1.8	5.9	2018 г. ночи
Сайт ALMA, Чили	5058	0.51	1.7	2018 г. зима и лето в Южном полушарии

Таблица 5. Значения dPWV за период с 2009 по 2019 гг.

Сайт	dPWV			
	Зима, день/ночь		Лето, день/ночь	
	мм	%	мм	%
Али 1, Тибет, КНР	0.13/0.14	32	0.13/0.13	3
Плато Суффа, Узбекистан	0.24/0.23	9	0.22/0.25	3
Монды, Саяны, РФ	0.34/0.35	37	0.30/0.30	3
Хулугайша, Саяны РФ	0.23/0.23	38	0.20/0.20	3
БТА, Северный Кавказ, РФ	0.39/0.37	10	0.36/0.39	3
Майданак, Узбекистан	0.21/0.20	6	0.20/0.22	2.4
Гара-Баши, Эльбрус, РФ	0.17/0.16	14	0.15/0.17	3
Сайт ALMA, Атакама, Чили	0.1/ 0.1	20	0.1/0.11	6
Абишира-Ахуба, Архыз, РФ	0.22/0.21	10	0.20/0.22	3
Пик Терскол, Эльбрус, РФ	0.17/0.16	9	0.15/0.17	2.8
Музтаг-Ата, Памир, КНР	0.11/ 0.1	14	0.1/0.1	2.7
Акташтау, Узбекистан	0.19/0.17	10	0.18/0.2	3

По данным реанализа (табл. 4), район строящейся открытой смотровой площадки (3016 м) на южном склоне хребта Абишира-Ахуба в Архызе имеет почти в два раза меньший PWV, чем район БТА, и существенно более низкий PWV в сравнении с близким по высоте районом горы Гобулчат (3005 м) над северным склоном хребта Арксара, однако ТСС в обоих местах не лучше, чем в районе расположения БТА, где с учетом нижнего слоя облачности ТСС не менее 0.5 зимой.

Обратим особое внимание на пик Хулугайша на Саянах, который у нас имеет самый низкий PWV. На пике Хулугайша с советских времен располагается станция космических лучей ИСЗФ, имеются ровные площадки, туда подведена грунтовая дорога и коммуникации.

Неплохие астроклиматические характеристики имеет Гара-Баши в Приэльбрусье. На Гара-Баши располагается верхняя станция канатной дороги самого высокогорного горнолыжного курорта в Европе, туда подведена

техническая дорога и коммуникации. Однако ПСС в этом районе сравнима с районом расположения БТА – не более 2250 ч в год, а ТСС там немногим лучше, чем в районе БТА.

Наибольший астроклиматический интерес на Северном Кавказе представляет его восточная часть, в частности, два соседних района горного Дагестана – Рутульский и Агульский. Районы гор Хорай (3521 м) и Каталнац (3780 м) в Рутульском районе, гор Курапдаг (3724 м), Алахундаг (3842 м) и Курадаг (3837 м) в Агульском районе, имеют достаточно низкие значения PWV и ТСС одновременно. На склоне горы Хорай на высоте 2200 м расположено историческое село Цахур. Гора Хорай имеет ровные площадки на своей вершине, туда несложно подняться по склону горы пешком или обходными тропами на лошади. Склоны гора Каталнац достаточно легко доступны из высокогорного села Аракуль (2100 м). К горе Курапдаг из села Чираг (2200 м) Агульского района идет горная тропа в село Уна Рутульского района, которая поднимается до высоты 3570 м.

Последние данные, полученные по реанализу UERA с пространственным разрешением 10 км, показывают, что оба района представляют астроклиматический интерес, но более северный Агульский район выглядит предпочтительнее соседнего южного Рутульского района как по PWV, так и по ТСС. Ряд высокогорных сел этих двух районов, а также прилегающих к ним Курахского, Ахтынского и Кулинского районов имеют по данным ERA-5 очень высокие показатели ПСС – 2500-3000 ч в году. Годовая норма осадков в таких селах не более 500 мм, а на горах Курапдаг, Алахундаг – не более 750 мм, тогда как в районе расположения БТА – не менее 1400 мм. Среднегодовая температура на горе Курапдаг составляет $-5.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, при том, что в районе расположения БТА на склоне горы Пастухова она выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, на вершине горы Пастухова она составляет $-0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Количество метеорологически ясных ночей на горе Курапдаг составляет, по нашим предварительным оценкам, не менее 70%, на горе Пастухова – не более 35%.

В указанные перспективные районы горного Дагестана необходимо оперативно организовать экспедицию для изучения особенностей их астроклимата. На вершине горы Курапдаг имеется естественная ровная каменная площадка, однако более подходящим для размещения телескопа может стать один из склонов горы Курапдаг, где проще найти ветровую тень. В селе Чираг (2200 м) также необходим локальный и длительный мониторинг метеопараметров: температуры, силы и направления ветра, давления и относительной влажности. По данным ERA-5 за 2019 г среднегодовая скорость порывов ветра на горе Курапдаг не превышает 8 м/с, что ниже чем в районе расположения БТА, однако по многолетним наблюдениям местных жителей в весенний период (март-апрель) в данном районе нередко случаются сильные ветры со скоростью до 15 м/с, что требует повышенного внимания исследователей астроклимата с учетом ожидаемых размеров и точности ESMT. Необходимо также провести измерение температуры и пульсаций скорости ветра с помощью УЗ метеостанции – это нужно для определения интенсивности флуктуаций и структурного коэффициента показателя преломления воздуха C_n^2 .

Выполненный нами статистический анализ данных ERA-5 показывает, что $PWV < 3$ мм и $TCC < 0.5$ достигаются на пике Хулугайша и на горе Хорай в течение примерно 50% времени, а их астроклиматические возможности в этом плане сопоставимы. Преимущество Саян по влагосодержанию компенсируется лучшими показателями ясной атмосферы (ТСС и ПСС), а также лучшим прогнозом астрономической видимости в указанных районах горного Дагестана.

По нашим предварительным оценкам с учетом полученной статистики PWV , $dPWV$, ТСС, а также ожидаемой яркостной температуры атмосферы, ограничивающей чувствительность криорадиометров, но без учета астрономической видимости (seeing) в субмм диапазоне волн, что требует специальных исследований, предельная рабочая частота для мм/субмм телескопа составляет: на плато Суффа – 270 ГГц, Акташтау – 350 ГГц, Абишира-Ахуба – 230 ГГц, Гара-Баши – 270 ГГц, гора Хорай – 350 ГГц, Монды – 300 ГГц, пик Хулугайша – 350 ГГц. Для тибетских сайтов – 850 ГГц

(Янпачен, 4300 м), 950 ГГц (Али 1, 5100 м), 1500 ГГц (Али 2, 6100 м). Горная пустыня на Музтаг-Ата (4536 м) является альтернативой сайту Али 1, но требует значительно больших инвестиций в инфраструктуру. Аналогичные или даже лучшие астроклиматические характеристики имеет Восточный Памир в районе Шорбулак в Таджикистане [52], что подтверждается и данными реанализа, но вопрос возможности его использования пока широко не обсуждается в силу значительной удаленности и политико-экономических причин. Для освоения сайта Шорбулак нужна более широкая международная кооперация с участием Индии.

Для получения полной картины астроклимата возможных мест размещения ESMT был также изучен Крым. В частности, методами реанализа нами исследован полигон «Карадаг» ННГУ в Крыму ($44^{\circ}55'37.07''$ с. ш., $35^{\circ}11'31.20''$ в. д.) на предмет получения медианных значений PWV, dPWV, TCC в различные сезоны и время суток. Крым в целом и район горы Карадаг в частности имеет по нашим оценкам медиану PWV зима/лето не менее 9/24 мм. Однако в ряде работ, в частности [53, 54], замечено периодическое появление на полигоне аномально сухих атмосферных условий. В эти периоды, когда дуют сухие степные северные ветры, поглощение атмосферы на волне 2 мм летом опускается до уровня существенно ниже 0.1 Нп летом. Это означает пропускание атмосферы летом выше 90%, а $PWV < 4$ мм. Пространственное разрешение методов реанализа пока составляет не выше 10 км (UERA), что не дает возможность адекватно увидеть локальную атмосферную аномалию существенно меньшего масштаба, но ее влияние должно проявиться и с таким пространственным разрешением. По результатам реанализа выделить полигон «Карадаг» по уменьшению PWV или TCC нам не удалось. Уверенно выделяется по снижению TCC на 10-15% расположенный поблизости полуостров Меганом ($44^{\circ}48'35''$ с. ш., $35^{\circ}04'45''$ в. д., высота 358 м, ширина не более 5 км). Полуостров Меганом, отличающийся особо сухим и солнечным климатом, классифицируется климатологами как полупустыня, что больше характерно для климатических условий Туркмении и Узбекистана. Средневзвешенное значение

суммарной солнечной радиации на Меганоме одно из самых высоких в Крыму (максимальное – $1762 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в селе Богатовка). В одном из наиболее солнечных мест на ЮБК Судак – $1674 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ [55]. ПСС на мысе Меганом не менее 2350 часов в год [56], в селе Богатовка на полуострове Меганом ПСС ожидается не менее 2500 ч. Измерения ПСС с помощью солнечного фотометра (пиранометра) целесообразно выполнять в районе мыса Меганом с одной стороны полуострова и севернее села Богатовка (Токлук, 154 м) в районе хребта Токлук-Сырт (499 м) – с другой. Расстояние между с. Богатовка и ближайшей к нему бухтой Каспель, где может повышаться испарение с поверхности воды и возможны морские туманы, составляет более 8 км. Количество выпадающих осадков на Меганоме – одно из самых низких в Крыму, 272 мм, это в три раза меньше испарения, что дает самый низкий коэффициент увлажнения в Крыму ($k = 0.26$). Для сравнения, в других местах с низкой нормой осадков: Судак – 318 мм ($k = 0.30$), Карадаг – 375 мм ($k = 0.33$), Феодосия – 376 мм ($k = 0.38$) [57]. Это в среднем в 1.5 раза меньше, чем выпадает осадков в степном Крыму, в 2 раза меньше, чем на ЮБК и в 3 раза меньше, чем в горах Крыма. Среднегодовая норма осадков в одном из самых солнечных мест Крыма Евпатории (ПСС 2400 ч) – 375 мм. Норма осадков в Феодосии составляет 407 мм, в Симферополе – 532 мм, в Ялте – 618 мм, на Ай-Петри – 1112 мм [58]. Для сравнения, среднегодовая норма осадков для Восточного Саяна составляет не менее 700 мм, Приэльбрусья – не менее 1000 мм, а для горных районов Западного СК, включая Архыз – не менее 1500 мм.

Однако высокая солнечная радиация повышает температуру воздуха, что ведет к увеличению его абсолютной влажности, поскольку с ростом температуры воздух может удерживать больше влаги до состояния своего насыщения. При этом относительная влажность падает, а абсолютная, а вместе с ней и PWW, растет. Абсолютная влажность воздуха также зависит от испарения, коэффициента увлажнения k и розы ветров, поскольку ветры могут нести как влажный южный воздух с моря, так и сухой степной воздух с севера.

К сожалению, наибольшее количество полностью ясных дней и ночей на полуострове Меганом, как и в целом в Крыму, приходится на теплый и жаркий период года с апреля по октябрь. Тем не менее, если рассматривать не полные сутки, а 21 час из них, картина ясного неба получается вполне приемлемой. Так, согласно [59], повторяемость ясного неба в Феодосии зимой 35% (28/30/ 46), весной 61% (56/61/67), летом 76% (75/76/78) и осенью 55% (71/59/34), а повторяемость ясного неба на полуострове Меганом должна быть выше.

Мы также изучили методами реанализа астроклиматические возможности горного Крыма, в частности, самой высокой его вершины – горы Роман-Кош (1545 м). Гора Роман-Кош покрывается снегом в зимний период (не менее 4 месяцев) с средними температурами зимой ночью – 7-8 °С, нормой осадков обычно не более 800 мм, ПСС не менее 2500 ч. Отрицательные температуры зимой и невысокие температуры летом (на 10-20 °С ниже, чем на морском берегу (Паранит – Большая Ялта) дают среднегодовую температуру 3.8 °С. Гора Роман-Кош привлекает обилием солнца, умеренным количеством осадков и неплохой транспортной доступностью. По данным реанализа, в этом горном районе нередко наблюдается падение PWV при северо-восточном ветре до 1-2 мм с высокой корреляцией по ТСС. Однако медиана ТСС зимой в данном горном районе, как и в Крыму в целом уверенно выше 0.6, что в значительной мере ограничивает астроклиматические возможности горного Крыма.

Преимущества горного сайта неоспоримы, но относительная влажность RH, от которой зависит и абсолютная влажность АН, в горах обычно достаточно высока за исключением горных пустынь. В условиях отсутствия горных пустынь в РФ, наиболее пригодных для наземной мм/субмм астрономии, нами также рассмотрен один из пустынных районов РФ с крайне засушливым климатом и низкой RH (до 20% зимой и до 10% летом) на юге Астраханской области, в частности бархан Большой Брат в 15-25 км северо-западнее г. Астрахань (46°25'47" с. ш., 47°29'20" в. д.), район Астраханского газоперерабатывающего завода – 10 км восточнее ж/д станции Аксарайская и окрестности соленого озера Баскунчак в Ахтубинском районе Астраханской области в 10-15 км от ж/д

станции Верхний Баскунчак ($46^{\circ}13'49''$ с. ш., $46^{\circ}43'06''$ в. д.). ПСС указанных районов составляет до 2470 ч в год, ежегодная норма осадков 180 мм, число дней с осадками не превышает 25 в год, повторяемость ясного неба зимой/летом в районе поселка Верхний Баскунчак не хуже 35%/60% [60]. В степных и пустынных районах Астраханской области активно развивается солнечная энергетика, суммарная солнечная радиация здесь достигает $1600 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, что не хуже, чем в среднем по Крыму, за последние четыре года введено в эксплуатацию 12 солнечных электростанций (СЭС) общей мощностью 285 МВт. Средние температуры зимой здесь ниже, чем в горном Крыму, как правило, здесь зимой наблюдается и меньшая облачность. Первые оценки с помощью реанализа дают в районе бархана Большой Брат медиану PWV зима/лето не хуже 5/10 мм, что почти в два раза меньше, чем в Крыму. Однако мы не увидели здесь высокой корреляции PWV и ТСС, более того, часто видна их антикорреляция, т. е. падения PWV обычно происходят не в ясную погоду, а в условиях облачности, нередко сплошной. Это может являться следствием испарения с водной поверхности Каспийского моря, розы ветров и переноса облаков нижнего яруса в близко расположенный к нему пустынный район.

6. Возможности ESMT в сравнении с другими мм/субмм инструментами

С помощью телескопов ESMT, оснащенных приемными камерами предельной чувствительности, можно будет получать широкоформатное многопиксельное и многоцветное изображение протяженных источников, включая относительно холодные объекты, которые излучают большую часть своего излучения в мм/субмм диапазоне, экзопланеты и протопланетные диски. Перспективными направлениями является астрохимия, включая исследования фазы образования звезд и планет, поиск новых межзвездных молекул, космических мазеров и мегамазеров в областях звездообразования.

Телескопы ESMT смогут продвинуть науку о реликтовом излучении и гравитации: поляризация реликтового излучения и спектральные искажения реликтового излучения после рекомбинации и до эпохи реионизации («Темные

века»), эффект СЗ в горячем газе скоплений галактик и эволюция сверхскоплений галактик через релятивистский эффект СЗ (rSZ), изучение химической эволюции и истории ионизации Вселенной, природы темной материи и темной энергии, субмиллиметровое послесвечение обнаруженных источников гравитационных волн, отображение горизонта событий черных дыр при участии в ЕНТ [8].

Телескопы ESMT предоставят возможность наблюдений экзопланет большой массы, вращающихся вдали от своих звезд. Это газовые гиганты, наблюдаемые яркостные температуры которых сопоставимы с температурой Солнца. В субмиллиметровом диапазоне сами родительские звезды имеют низкую яркость, что облегчает наблюдение за экзопланетами-гигантами.

На российском телескопе ESMT планируется проводить также исследования Солнца совместно с радиотелескопом РАТАН-600 и ALMA, включая изучение квазипериодических колебаний плазменных структур [61]. Многоволновые и мультиинструментальные солнечные наблюдения на миллиметровых (субмиллиметровых) и сантиметровых волнах несут информацию о широком диапазоне высот в солнечной атмосфере: от хромосферы до переходной области (TR) и короны, а также делают возможным всестороннее изучение атмосферы солнечных пятен. Для этого на российском телескопе ESMT предложено перекрыть четыре частотных диапазона с поляризацией, быстро переключаемых перископическим зеркалом в фокальной области:

- 1/18-40 ГГц, два луча с круговой (L&R) поляризацией + спектр (20 каналов, $\Delta f = 500$ МГц),
- 2/75 ГГц ± 2 ГГц, 8×8 пикселей с круговой (L&R) поляризацией (CPSS),
- 3/100 ГГц ± 5 ГГц, 8×8 пикселей с круговой (L&R) поляризацией (CPSS),
- 4/150 ГГц ± 5 ГГц, 8×8 пикселей с круговой (L&R) поляризацией (CPSS).

CPSS – селективная поверхность с круговой поляризацией (L&R), отражает одну круговую поляризацию и пропускает другую [62], что позволяет принимать сигнал двух круговых поляризаций одновременно с одного направления с помощью двух приемных матриц с антенными элементами разной круговой поляризации. Другим матричным решением для изучения активности Солнца в мм диапазоне является чередование облучателей разной круговой поляризации в одной матрице с неохлаждаемыми микроболометрами [63]. Предельный диапазон длин волн и другие параметры существующих и будущих телескопов субмм телескопов приведены в табл. 6. Как видно из табл. 6, телескоп ESMT на Тибете по своим возможностям может превзойти существующие телескопы мира в классе одиночных мм/субмм телескопов.

Из перспективных одиночных инструментов еще более продвинутыми являются проекты SSAT и AtLAST. В проекте 25-метрового субмиллиметрового телескопа SSAT в Чили (5612 м) требования к точности для первичной поверхности лучше, чем 15 мкм СКО во всех рабочих условиях, а размер поля зрения – 1° [64]. Однако по проекту телескоп SSAT заключен в астродом, что увеличит его стоимость, но значительно снизит ветровую нагрузку и не позволит прямым солнечным лучам попадать на панели телескопа и его опорную конструкцию. По проекту SSAT имеет активную поверхность, состоящую из 162 сегментов отражателя, каждый из которых установлен на трех управляемых компьютером исполнительных механизмах. Для достижения наилучших пассивных характеристик и повышения термостойкости не только ферменный каркас, но и опорная конструкция для сегментов отражателя с алюминиевой плиткой будет иметь подрамник из углепластика. Для реализации поля зрения 1° будут использоваться огромное вторичное (диаметром 3 м) и третичное (2.7 м × 3.9 м) зеркала с подрамником из углепластика. Для заполнения столь широкого поля зрения планируется применить режим мозаики с использованием нескольких приемных камер предельной чувствительности на базе KID.

Таблица 6

Телескоп	Местоположение	Диаметр, м	Высота, м	Самая короткая длина волны, мм
LMT	Мексика (Сьерра-Негра)	50	4600	0.85
IRAM	Испания (Сьерра-Невада)	30	2850	0.9
JCMТ	Гавайи (Мауна-Кеа)	15	4092	0.4
АРЕХ	Чили (Атакама)	12	5107	0.23
GLT*	Гренландия (Саммит, в настоящее время в тестовом режиме в Туле)	12	3210	0.2
AMT*	Намибия (гора Гамсберг)	12-16	2347	0.86
NOEMA*	Франция (Альпы, Плато де Бюр)	15×12	2550	0.8
ALMA	Чили (Атакама)	12×54 + 7×12	5058	0.32
SPT	Южный полюс	10	2800	0.4
LLAMA*	Аргентина (Атакама)	12	4820	0.4
SMT	США (Аризона, Маунт-Грэм)	10	3185	0.3
CCAT- prime*	Чили (Атакама)	6	5616	0.2
CCAT**	Чили (Атакама)	25	5616	0.2
AtLAST**	Чили (Серро Чайнантор)	50	5612	0.3
ESMT**	Узбекистан/РФ/КНР	21/21/21	3383/ 3521/ 5100	0.86/ 0.86/ 0.2

* строящиеся с возможностью завершения в течение ближайших 5-7 лет

** проекты

Параметры телескопа CCAT столь амбициозны, что пока на Cerro Chajnantor реализуется 6-метровый CCAT-prime с аналогичными возможностями в качестве прототипа. В последние годы активность в отношении 25-метрового CCAT значительно снизилась, и на его базе, и в том же месте изучается возможность размещения Atacama Large Aperture Submillimeter Telescope (AtLAST) с еще более амбициозными характеристиками по полю

зрения (2°), при том, что его планируемый диаметр ~ 50 м, а диапазон до ~ 1 ТГц [34, 65]. Реализация проекта почти 40-метрового оптического и ИК-телескопа E-ELT в Чили говорит о том, что технические возможности для составного телескопа таких размеров сегодня существуют даже в оптике. Однако очень серьезными являются вопросы ветровых деформаций и АО для их отработки, его стоимости и требований к астроклимату даже на высоте 5612 м, поскольку сама высота не гарантирует высокое качество изображений как в оптике, так и в субмм диапазоне волн. Такой телескоп без АО сможет работать во всем субТГц диапазоне при исключительно спокойной атмосфере и только ночью, поскольку размер апертуры 50 м является, по нашим оценкам, критическим из-за влияния фазовых флуктуаций атмосферы приземного слоя в мм диапазоне волн. Но эти вызовы должны стимулировать развитие средств АО, о чем речь пойдет в п. 8.

7. Турбулентность атмосферы в равнинных и горных условиях и способы ее анализа

В отличие от естественного уменьшения оптической толщи атмосферы энергия турбулентности с высотой может возрастать или уменьшаться. Структура турбулентности в зависимости от высоты особенно изменчива в горных условиях, где появляются дополнительные факторы генерации и диссипации турбулентности. Для астрономических телескопов наземного базирования, обычно размещаемых в горах, помимо динамической турбулентности необходимо различать и явление оптической турбулентности, которое ассоциируется с мелкомасштабными флуктуациями показателя преломления воздуха по лучу зрения. Параметры оптической турбулентности зависят от метеорологических параметров, которые для радиодиапазона, наряду с характеристиками температуры воздуха, также включают в себя влажность воздуха. В оптическом диапазоне электромагнитного спектра при расчете основной величины оптической турбулентности – структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха C_n^2 , влажностью воздуха обычно пренебрегают.

Параметры оптической турбулентности в определенной степени зависят от развитости воздушных течений. В атмосфере всегда наблюдается вертикальное перемешивание воздуха. На равнине вертикальная компонента скорости ветра составляет единицы миллиметров в секунду, а в горах, где обычно размещаются астрономические телескопы, вертикальные токи могут достигать нескольких метров в секунду. С учетом того, что атмосфера стратифицирована по температуре (плотности) воздуха различным образом (неустойчивая, нейтральная или устойчивая стратификации), вертикальное перемешивание определенных масштабов приводит к изменению распределений интенсивности турбулентных флуктуаций по высоте. Это один из сценариев повышения турбулентности на отдельных высотах в атмосферном пограничном слое, связанном с вариациями вертикальных движений. В горах пограничный слой, определяемый по величине вертикальных турбулентных потоков количества движения, обычно тоньше, чем на равнине, и характеризуется сложной структурой. При обтекании в горах возникает вынужденная конвекция на наветренном склоне, а с подветренной стороны в зависимости от стратификации и ориентации горы по отношению к воздушному потоку могут формироваться горные волны, роторы, крупные вихри, которые определяют возможность вертикального обмена, в том числе флуктуациями температуры и показателя преломления воздуха. Для создания модели турбулентности конкретного пункта необходимо привлечение измерений вертикальных профилей средних и турбулентных атмосферных характеристик.

Помимо атмосферного пограничного слоя, вертикальная мощность которого варьирует от нескольких сотен метров до нескольких километров, на данные наблюдений оказывает влияние турбулентность в свободной атмосфере. Для описания оптической турбулентности в свободной атмосфере часто применяется способ, основанный на анализе скорости воздушного потока на изобарической поверхности 200 гПа, соответствующей слою формирования крупномасштабного струйного течения. Анализ астроклиматической

характеристики V_{200} позволяет определить эффективную скорость переноса турбулентных флуктуаций и характеристики ее вариаций.

Для первичного определения таких астроклиматических характеристик, как V_{200} для выбранного сайта, пространственных распределений повторяемости общей облачности и вертикальных токов, а также для оценки вертикальных профилей метеорологических характеристик необходимо использовать данные современных архивов реанализа высокого пространственного разрешения (Era-Interim, Era5). Вместе с тем, как показывают результаты исследований для Байкальской астрофизической обсерватории, архивы реанализа даже высокого пространственного разрешения не воспроизводят мезоструй, с обострением градиентов на периферии которых мы ассоциируем уменьшение радиуса Фрида до 2.5 см [66].

Для оценки вертикальных профилей структурной характеристики показателя преломления воздуха в оптическом диапазоне может быть использован оригинальный способ параметризации характеристик мелкомасштабной турбулентности, основанный на расчете энергии наиболее крупномасштабных возмущений бароклинной природы и учете зависимостей спектральной плотности флуктуаций от частоты в разных диапазонах энергетического спектра атмосферных течений [67, 68]. Для радиодиапазона и учета влажности способ параметризации потребует модифицировать. Спектральные оценки высотных профилей структурной характеристики показателя преломления воздуха должны быть сопоставлены с данными измерений волнового фронта через интегральные величины структурной постоянной показателя преломления воздуха по лучу зрения телескопа.

8. Условия и возможности применения адаптивной оптики на ESMT

Турбулентность атмосферы оказывает существенное влияние на амплитуду и фазу электромагнитных волн и, как следствие, на качество астрономических изображений. Один из способов борьбы с атмосферной турбулентностью состоит в использовании фазосопряженных систем

адаптивной оптики, улучшающих качество астрономических изображений. Под системой адаптивной оптики понимают оптико-электронную систему, которая содержит три основных элемента:

- 1) анализаторы изображения и/или датчики волнового фронта;
- 2) рабочую станцию или компьютер с программным обеспечением для формирования сигналов коррекции;
- 3) корректирующие элементы, которые исправляют искажения волнового фронта.

В системах АО обычно используют тип-тилт-зеркало для коррекции общих углов наклона волнового фронта, а также одно или несколько деформируемых зеркал, форма поверхности которых изменяется в процессе работы для коррекции мелкомасштабных искажений волнового фронта.

Корректировка искажений волнового фронта осуществляется в реальном масштабе времени путем подачи специальных корректирующих сигналов на управляющие системы зеркал. Сигналы вырабатываются устройством на основе измерений датчика волнового фронта. Для измерений искажений волнового фронта существуют разнообразные методы.

В работе [69] дан обзор состояния и развития систем адаптивной оптики в звёздной и солнечной астрономии. Наиболее популярными для анализа изображений в настоящее время являются датчики волнового фронта типа Шака – Гартмана. Такой датчик состоит из матрицы микролинз и расположенного в их фокальной плоскости фотоприёмника. Линзы датчика разделяют исследуемый волновой фронт на субапертуры (апертуры каждой из микролинз), формируя в фокальной плоскости совокупность фокальных пятен. Положение каждого из пятен зависит от локального наклона волнового фронта пучка, пришедшего на вход датчика. Измеряя поперечные смещения фокальных пятен, можно вычислить средние углы наклонов волнового фронта в пределах каждой из субапертур. По этим величинам вычисляется профиль волнового фронта на всей апертуре датчика. В целях расширения поля зрения, в пределах которого происходит определение профиля волнового фронта, в

многообъектных и мультисопряженных системах адаптивной оптики могут применяться несколько датчиков Шака – Гартмана, а также датчик кривизны волнового фронта. В табл. 7 приведены параметры ведущих оптических систем адаптивной оптики.

Таблица 7

Телескоп	Размер главного зеркала, м	Датчик волнового фронта	Число субапертур
VLT, Мауна Кеа, Гавайи	4×8.2	Шака – Гартмана, датчик кривизны	14×14
Keck I, Мауна Кеа, Гавайи	10	Шака – Гартмана	20×20
Subaru, Мауна Кеа, Гавайи	8.2	датчик кривизны	188
Gemini-S, Чили	8.1	Шака – Гартмана	16×16

Технические параметры адаптивной системы и ее элементов зависят от астрономической видимости (*seeing*), значения радиуса Фрида r_0 , времени когерентности и изопланатического угла атмосферы. Даже для лучших астрономических обсерваторий время работы адаптивной системы оптического телескопа ограничено повторяемостью и астрономической видимостью (для солнечных телескопов не более 10% от возможного наблюдательного времени в году).

Атмосферная постоянная времени τ_0 , определяющая быстродействие работы адаптивной системы и ее отдельных элементов определяется как

$$\tau_0 = 0.31 \frac{r_0}{V},$$

где V – эффективная скорость ветра, усредненная по высоте с учетом профиля $C_n^2(h)$ и имеющая среднее статистическое значение в районе 5-10 м/с. Используя среднее статистическое значение скорости ветра 5 м/с и значение радиуса Фрида 5 см для оптического диапазона, получим, что атмосферная постоянная времени оценивается величиной ~ 3.1 мс. Имея некоторое значение r_0 в видимом диапазоне, можно пересчитать его значение для субмм диапазона по формуле [11,70] $r_0(\lambda_2) = r_0(\lambda_1)(\lambda_2/\lambda_1)^{6/5}$.

Зависимость радиуса Фрида от длины волны излучения показывает, что адаптивная оптика должна лучше работать в длинноволновой области спектра, где значения радиуса выше. В некотором предельном случае при значении в оптическом диапазоне r_0 (535 нм) = 5 см, средние значения r_0 (0.1-1 мм) в радиодиапазоне составят в пределах от ~400 до ~20 м. Атмосферная постоянная времени составит $\tau_0 \geq 1$ с.

Характерные значения структурной постоянной флуктуаций показателя преломления сухой компоненты воздуха изменяются в пределах от 10^{-16} до $10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$ в приземном слое атмосферы и от 10^{-17} до $10^{-20} \text{ м}^{-2/3}$ в свободной атмосфере. Предварительные расчеты показывают, что учет влажной компоненты в мм/субмм диапазоне спектра приводит к возрастанию на порядок и более значений структурной постоянной флуктуаций показателя преломления воздуха, особенно в атмосферном пограничном слое. В этой связи можно ожидать, что значения параметра Фрида уменьшатся за счет возрастания структурной постоянной флуктуаций показателя преломления влажного воздуха в мм/субмм диапазоне.

Дисперсия углов прихода может быть определена как [45]

$$\sigma_a^2 = 6.74 \frac{D^{-1/3}}{k^2 r_0^{5/3}},$$

где D – диаметр апертуры, k – волновое число. Ожидаемый среднеквадратичный угол наклона волнового фронта при учете вертикального профиля структурной постоянной флуктуаций показателя преломления сухого воздуха для телескопа с апертурой 21 м для длины волны 1 мм и параметре Фрида 100 м составляет около 1", а максимальный ± 3 ". В то же время в мм/субмм диапазоне с учетом увеличения значений структурной постоянной флуктуаций показателя преломления влажной компоненты воздуха на порядок и более, характерные значения параметра Фрида уменьшатся до нескольких десятков метров, что приведет к тому, что астрономическая видимость телескопа ESMT в наименее благоприятных условиях, например, днем, может превышать его дифракционный предел уже на волне 1 мм. Таким образом, оценки параметра

Фрида для длины волны ~ 1 мм с учетом влажной компоненты могут быть сопоставимы с размером апертуры телескопа и должны лежать в основе средств и разрабатываемого метода адаптивной коррекции искажений изображений в мм/субмм диапазоне волн. Более точные оценки будут получены после построения модели эволюции структурной постоянной флуктуаций показателя преломления влажного воздуха в мм/субмм диапазоне.

В радиодиапазоне значение частоты работы адаптивной системы в замкнутом контуре должно быть не ниже ~ 1 Гц при скорости ветра 5 м/с. Учитывая, что планируемый размер апертуры телескопов ESMT составляет 21 м, можно предположить, что доминирующее влияние атмосферных неоднородностей должно сводиться к наклонам волнового фронта и дрожанию изображения астрономического источника, а основное назначение адаптивной оптики – к его устранению.

Полученные оценки радиуса Фрида и атмосферной постоянной времени показывают, что в сравнении с оптическим интервалом спектра в радиодиапазоне адаптивная система может эффективно работать для более широкого спектра изменений атмосферных характеристик (радиуса Фрида, эффективной скорости ветра).

Значения характерной частоты и радиуса Фрида должны быть уточнены по результатам исследований структуры оптической турбулентности для конкретных сайтов.

Изложенный нами квазиоптический подход к проблеме требует анализа возможности его применения в субмм диапазоне или адаптации к субмм диапазону, что выходит за рамки данной статьи. Можно допустить, что рассмотренный подход будет работать при достаточно низких PWV и dPWV. При расчете структурной постоянной турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха в радиодиапазоне необходимо уже основываться не на выражении связи показателя преломления с температурой воздуха и давлением как делают в оптике, а учитывать дополнительные слагаемые, которые включают в себя

парциальное давление водяного пара. Показатель преломления влажного воздуха n может быть рассчитан по эмпирической формуле Смита – Вейнтрауба:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = \alpha \frac{P_d}{T} + \beta \frac{P_w}{T} + \gamma \frac{P_w}{T^2},$$

где $\alpha = 77.6 \cdot 10^{-2}$ К/Па, $\beta = 64.8 \cdot 10^{-2}$ К/Па, $\gamma = 3.776 \cdot 10^3$ К²/Па, P_d и P_w – парциальное давление сухого и влажного воздуха, $P_d = \rho_d RT/M_d$, $P_w = \rho_w RT/M_w$, $R = 8.314$ Дж/(моль · К) – универсальная газовая постоянная, $M_d = 28.96$ г/моль и $M_w = 18.02$ г/моль – молярные массы сухого и влажного воздуха, ρ_d и ρ_w – плотности сухого и влажного воздуха.

Из двух влажных членов наиболее существенен второй, и тогда, согласно [71], флуктуации оптического пути и показателя преломления атмосферы:

$$dL = dN \approx dn \approx \gamma \frac{dP_w}{T} \approx \frac{\gamma R}{M_w T} dPWV \approx \frac{1741 \text{ K}}{T} dPWV.$$

Приведенная зависимость показателя преломления влажного воздуха и его флуктуаций отражает его недисперсионную часть. Дисперсионная часть показателя преломления в мм/субмм диапазоне аналитически плохо изучена и пока оценивается с помощью моделей, где решается уравнение переноса и используются модельные профили температуры [72].

При этом, говоря о пространственных масштабах флуктуаций показателя преломления влажного воздуха, при статистическом описании (при расчете средних или медианных значений) можно считать, что водяной пар переносится ветром как пассивная примесь. С этой точки зрения масштабы турбулентных флуктуаций показателя преломления подобны турбулентным флуктуациям скорости ветра (внутренний масштаб динамической турбулентности – единицы миллиметров).

Заметим, что применение АО в субмм диапазоне, как и в оптическом, возможно только в хороших астроклиматических условиях, в частности, при достаточно низком PWV и dPWV, когда фазовые флуктуации, которые нужно исправлять, существенно преобладают над амплитудными, и сами фазовые флуктуации и вызванные ими наклоны волнового фронта не столь значительны,

что связано с размерами зеркал третичной оптики. Даже если характерный временной масштаб флуктуаций наклона волнового фронта не превышает 1 Гц, управлять зеркалами размером ~ 1 м нужно с существенно большей частотой – не менее 5 Гц, чтобы иметь плавное управление при наблюдаемых углах наклона. Поэтому адаптивную оптику можно рассматривать как эффективное средство улучшения не любых, а вполне удовлетворительных изображений, которые, тем не менее, можно еще улучшить. Это накладывает дополнительные астроклиматические требования к сайту, где планируется применение системы адаптивной оптики, а именно минимум мелкомасштабных амплитудных флуктуаций $dPWV$, когда имеют место фазовые флуктуации. Моделирование и эксперименты должны показать в дальнейшем возможность наложения и выполнения такого дополнительного астроклиматического условия.

Отметим в заключение, что в настоящее время АО активно применяется для улучшения качества изображений на мм/субмм интерферометре ALMA и других интерферометрах мм диапазона [12, 42, 73]. Техника фазовой коррекции интерферометра по измеренной радиояркостной температуре атмосферы и ее флуктуациям применяется и развивается на интерферометрах более 30 лет и основана на высокой корреляции обоих эффектов, имеющих одну природу – турбулентность паров воды на луче зрения телескопа. Ранние эксперименты показали наличие такой корреляции в 1970-х годах [74], и она оказалась тем выше, чем короче длина волны. В случае одиночного телескопа, самостоятельно формирующего изображение, WVR может использоваться для мониторинга и последующей коррекции флуктуаций фазы, возникающих в турбулентной атмосфере в сочетании с другими, в том числе квазиоптическими методами.

Из выполненного рассмотрения можно сделать вывод что в интересующем нас диапазоне волн опасность могут представлять главным образом наклоны волнового фронта, а не его искажения, и задача адаптивной оптики может сводиться к их коррекции (tip-tilt correction). В этом случае датчик

Шака – Гартмана будет избыточным и может быть заменен существенно более простым датчиком наклона волнового фронта. В качестве такого датчика предлагается применить высокочувствительную камеру коротковолнового ИК-диапазона (SWIR), которая сможет работать по нормальным опорным звездам 5-6^m в ночное и дневное время. При использовании внешнего металлосетчатого полосового фильтра на линию паров воды 940 нм или 1100 нм оптический телескоп с такой камерой будет хорошо чувствовать атмосферную воду, и полученная таким способом оценка астрономической видимости будет отражать как сухую, так и влажную компоненту показателя преломления.

Идея применения АО на одиночном мм/субмм телескопе впервые высказана в [75] применительно к LMT и GBT, где в качестве датчика наклона волнового фронта предлагалось применить WVR или малоапертурный ИК датчик для измерения флуктуаций PWV, которые связаны с изменениями оптического пути в пределах апертуры телескопа и могут быть поэтому пересчитаны в наклоны волнового фронта. Для прямого измерения наклонов волнового фронта считаем целесообразным применение дифференциальных измерителей турбулентности (ДИТ) – пар оптических труб телескопов (до 250 мм в диаметре) на одной монтажке с высокочувствительными камерами коротковолнового ИК-диапазона (SWIR). Полученные с их помощью смещения изображения звезды могут быть пересчитаны в наклоны волнового фронта для данного телескопа в ИК и субмм диапазонах с помощью модели. Необходимое количество ДИТ, чтобы решить аналогичную задачу для ESMT, 2-4 или более должно быть определено экспериментально путем изучения статистик корреляции наклонов волнового фронта на исследуемом сайте в пределах размера интересующей нас апертуры телескопа.

Заключение

В работе получила дальнейшее развитие концепция проекта ESMT. Приводится сравнение возможностей ESMT с другими мм/субмм инструментами и проектами. Сформулированы астроклиматические условия и

необходимые характеристики сайтов ESMT, приведены оценки осажденной воды PWV и dPWV для ряда практически интересных сайтов, полученные с помощью баз реанализа ERA-Interim и ERA-5. Как видно из нашего анализа, ряд сайтов РФ (пик Хулугайша на Саянах, горы Хорай и Курапдаг в Дагестане) превышают по своим астроклиматическим возможностям район плато Суффа зимой, низкий TCC на сайте Суффа летом не продуктивен из-за высоких значений PWV на сайте в летний период. На рассмотренных перспективных сайтах в дополнение к результатам реанализа и локального радиометрического измерения PWV необходимо организовать локальный мониторинг метеопараметров: температуры, направления ветра, давления и относительной влажности, C_n^2 , а также косвенные или прямые измерения “seeing”. В работе рассмотрено влияние турбулентности атмосферы на радиотелескоп и сделан вывод о возможности применения систем АО, в частности тип-тилт-коррекции, для улучшения качества субмм изображений ESMT.

Приложение. Структурный анализ распространения радиоволн в турбулентной атмосфере

Показатель преломления водяного пара отличается от показателя преломления сухого воздуха ($n = 1.0$) только в 4-м знаке, но с учетом длины пути в результате эффекта преломления радиоволны проходят в атмосфере дополнительный путь 2-3 м. Кроме того, среда не является однородной, что приводит к существенным изменениям оптической длины пути и оптической разности хода на базе интерферометра или в пределах апертуры телескопа. Если в однородной среде оптическая длина пути равна $L = nl$, а разность хода $\Delta L = n\Delta l$, то в неоднородной турбулентной среде

$$L(x, t) = \int_0^{L_0} n(l, x, t) dl.$$

В этом случае среднеквадратичная оптическая разность хода за интервал времени Δt может быть найдена как

$$\Delta L(\Delta x, \Delta t) = \sqrt{\left\langle \left(\int_0^{L_0} n(l, x_1, t) dl - \int_0^{L_0} n(l, x_2, t) dl \right)^2 \right\rangle},$$

где $\Delta x = x_2 - x_1$ – база интерферометра или размер сплошной апертуры.

Интегрирование малых изменений показателя преломления на большой длине и базе Δx может приводить к значимому эффекту при наличии крупных неоднородностей концентрации паров воды и их ветровом переносе. Но и без крупных неоднородностей пары воды сильно изменяют оптическую длину пути. Высокий дипольный момент молекулы воды обуславливает высокий показатель преломления водяного пара: для частот вдали от линий поглощения один миллиметр осажденного водяного пара в атмосфере соответствует примерно 6.8 мм дополнительного оптического пути [12]. Это само по себе может создавать изменение оптической разности хода и фаз волн, приходящих в разные точки большой апертуры. Но это медленный фазовый эффект, не слишком значительный для одиночной апертуры интересующего нас размера, последствия изменения амплитуды сигнала из-за изменения PWV на 1 мм будут не меньше. При прохождении волн через турбулентную тропосферу возникают случайные флуктуации фазы волны. Амплитуда и фаза рассеянных в атмосфере волн зависит от среднеквадратичного изменения показателя преломления, масштаба неоднородностей и пройденного пути. Крупномасштабные по сравнению с размером антенны флуктуации вызывают главным образом поворот диаграммы направленности в целом, а соизмеримые с размером антенны и меньшие флуктуации приводят к взаимной расфазировке полей в разных точках раскрытия, т. е. к расфокусировке антенны и, как следствие, к снижению ее КНД и разрешающей способности [40]. Для описания основных эффектов, связанных с влиянием неоднородностей коэффициентов преломления воздуха на работу радиотелескопов необходимо знать флуктуации фазы, возникающие при распространении радиоволн в атмосфере. Существенным здесь является общий набег фазы, возникающий при прохождении радиоволн сквозь всю толщу тропосферы Земли. Структура отдельных неоднородностей и их распределение

вдоль луча значения не имеет, важен интегральный эффект. Это обстоятельство, а также независимость коэффициента преломления от частоты в большей части радиодиапазона позволяет в качестве универсальной характеристики флуктуационных свойств тропосферы рассматривать структурную функцию ее эйконала.

Под эйконалом тропосферы понимают величину [45]

$$l = \int_0^L n(z) dz,$$

где $n(z)$ – коэффициент преломления воздуха на высоте z , L – геометрическая толщина слоя тропосферы. Структурная функция эйконала D_l равна дисперсии разности эйконалов, измеренных через интервал времени Δt вдоль трасс, расположенных на расстоянии $\Delta \rho$:

$$D_l(\Delta t, \Delta \rho) = \langle [l(t + \Delta t, \rho + \Delta \rho) - l(t, \rho)]^2 \rangle.$$

Часто достаточной характеристикой являются одномерные структурные функции, пространственная и временная:

$$D_l(\Delta \rho) = [l(\rho + \Delta \rho) - l(\rho)]^2,$$

$$D_l(\Delta t, \Delta \rho) = [l(t + \Delta t) - l(t)]^2.$$

В приближении геометрической оптики структурная функция фазы D_ψ отличается от структурной функции D_l квадратом волнового числа:

$$D_\psi = k^2 D_l.$$

Учет дифракции [45] показывает, что это соотношение справедливо для точек, расположенных не слишком близко, а именно, когда выполняется условие $\Delta \rho \ll \sqrt{\lambda L}$. С учетом того, что эффекты дифракции на неоднородностях тропосферы в коротковолновом радиодиапазоне малы, данное соотношение может выполняться и на меньших масштабах. В дополнение к ухудшению чувствительности радиотелескопа из-за поглощения в атмосфере флуктуации излучения атмосферы также сильно ограничивают чувствительность современных радиотелескопов в мм и субмм диапазонах волн. Для оценки временных масштабов флуктуаций и их интенсивности в зависимости от

размеров телескопа, длины волны и метеоусловий удобно использовать структурную функцию эйконала. Временной масштаб флуктуаций атмосферы определяется в основном длиной волны и усредненной скоростью ветра, а интенсивность зависит от размеров телескопа, высоты его расположения, а также содержания паров воды, кислорода и метеоусловий. Однако сам телескоп является фильтром низших пространственных частот, если речь идет о телескопе с заполненной апертурой, или определенного диапазона пространственных частот, если это интерферометр, поэтому размеры телескопа будут влиять и на временной спектр флуктуаций. Влияние определенных пространственных масштабов неоднородностей атмосферы будет в нем выделяться, а других – подавляться.

Поэтому важной частью изучения проблемы является измерение временных структурных функций выходного сигнала радиотелескопа.

Временная структурная функция эйконала флуктуаций фазы тропосферы имеет вид

$$D(\Delta t) = \langle [f(t) - f(t + \Delta t)]^2 \rangle = C_1^2 (\Delta t)^\delta,$$

где $f(t)$ – сигнал, прошедший через атмосферу, C_1^2 – структурный коэффициент, δ – показатель степени (2/3 или 5/3).

Спектр флуктуаций фазы $W(f)$ связан с временной структурной функцией как

$$D(\Delta t) = \int_0^\infty (1 - \cos 2\pi f \Delta t) W(f) df.$$

Интегральный структурный коэффициент зависит от высоты над уровнем моря (он падает с ростом высоты над уровнем моря), атмосферных условий [40]:

$$C_1^2 = 2.91 \int_0^{H_0} C_n^2(h) dh.$$

Флуктуации интенсивности характеризуются величиной среднеквадратичного отклонения σ_I .

Для расходящихся приземных трасс длиной L и расстоянием $\Delta\rho$ между их концами (краями апертуры)

$$C_n = \frac{\sigma_l}{\frac{3}{4}L\Delta\rho^{1/3}},$$

т. е. интенсивность флуктуаций σ_l линейно зависит от структурного коэффициента C_n и L , а от размеров инструмента – по степенному закону с показателем степени $1/3$.

В соответствии с однородной и изотропной моделью турбулентности атмосферы Колмогорова – Обухова выделяются три характерные области структурной функции эйконала на базе $\Delta\rho$ [45]:

1) область диссипации $\Delta\rho \ll l_0$, где l_0 – внутренний масштаб турбулентности,

$$D_l(\Delta\rho) = 1.64C_n^2 L l_0^{-1/3} \Delta\rho^2;$$

2) инерционный интервал $l_0 \ll \Delta\rho \ll L_0$, где L_0 – внешний масштаб турбулентности,

$$D_l(\Delta\rho) = 2.91\mu C_n^2 L l_0^{-1/3} \Delta\rho^{5/3},$$

где $\mu = 0.5$ при $\Delta\rho \ll \sqrt{\lambda L}$, $\mu = 1$ при $\Delta\rho \gg \sqrt{\lambda L}$;

3) область насыщения (энергетический интервал) $\Delta\rho \gg L_0$,

$$D_l = \text{const}(\Delta\rho).$$

Величина внутреннего масштаба турбулентности уверенно оценивается на уровне $l_0 = 1-10$ мм – она пренебрежимо мала по сравнению с интересующими нас масштабами. Внешний масштаб турбулентности $L_0 = 50-100$ м в зависимости от толщины турбулентного слоя и высоты точки наблюдения [45]. Экспериментальное изучение структурных функций [40] показало, что перед областью насыщения для $\Delta\rho \gg L_0$ есть переходная область с законом $2/3$, который не следует из теории Колмогорова – Обухова, что, видимо, связано с упрощенностью модели однородной и изотропной атмосферы, в то время как

турбулентности являются локально изотропными, а турбулентное движение имеет двумерный характер.

В результате модель структурной функции эйконала для интересующих нас области значений $\Delta\rho > l_0$ может быть представлена следующим образом [40]:

$$D_l(\Delta\rho) = \begin{cases} C_l^2 \Delta\rho^{\frac{5}{3}}, l_0 \ll \Delta\rho \ll L_1; \\ C_l^2 \Delta\rho^{\frac{2}{3}}, L_1 \ll \Delta\rho \ll L_2; \\ C_s^2, \Delta\rho \gg L_2. \end{cases}$$

где $L_1 = 0.7H$, где H – эффективная толщина слоя тропосферы. Принимая $H = 8$ км, получим $L_1 = 5.6$ км, $L_2 \sim 3000$ км.

Пространственные структурные функции нас интересуют с точки зрения понимания закона их поведения на интересующих нас масштабах. Изменяя $\Delta\rho$, мы выделяем интересующий нас масштаб атмосферных флуктуаций. На конкретном радио- или оптическом телескопе нас интересуют не пространственные, а временные структурные функции выходного сигнала, но их характер повторяет пространственные в соответствии с принципом переноса «замороженной турбулентности»: мелкомасштабные неоднородности дадут малые временные масштабы, крупномасштабные – большие.

Временная структурная функций атмосферных флуктуаций яркостной температуры атмосферы имеет вид [45]

$$D_b(t) = C_b^2 \tau^{5/3}.$$

В полученных в работе [41] структурных функциях хорошо видны две области: при $\tau < 100$ с структурные функции имеют степенной характер с показателем степени $\nu = 0.3-0.5$, при $\tau > 100$ с крутизна структурной функции возрастает, и в области $\tau = 500-1000$ с показатель степени достигает величины $5/3$. В работе сделан вывод, что показатель степени $\nu \approx 0.4$ относится к флуктуациям аппаратного происхождения, и в частности к остаточному шуму типа $1/f$ в приемнике с шумовым пилот-сигналом. Считая, что структурная функция $D_a(\tau)$ при $\tau = 1000$ с отражает атмосферную компоненту флуктуаций, можно найти структурный коэффициент C_a наблюдаемых флуктуаций радиоизлучения атмосферы

$$C_a(\tau) = \frac{\sqrt{D_a(\tau)}}{\tau^{5/6}}.$$

Таким образом, можно найти структурный коэффициент, относящийся к антенной температуре на угле наблюдений. Для перехода к яркостной температуре в зените необходимо учесть КПД антенны η на данной волне и зависимость от угла места h

$$C_b = C_a \frac{\sqrt{\sin h}}{\eta}.$$

Литература

1. Bubnov G.M. et al. Searching for new sites for THz observations in Eurasia. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2015. V.5. №1. P.64-72. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2014.2380473>
2. Koshelets V.P., Shitov S.V. Integrated superconducting receivers. *Superconductor Science and Technology*. 2000. V.13. №5. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/13/5/201>
3. Гольцман Г.Н., Лудков Д.Н. Сверхпроводниковые смесители на горячих электронах терагерцового диапазона и их применение в радиоастрономии. *Известия вузов. Радиофизика*. 2003. Т.46. №8-9. С.671-686. <https://doi.org/10.1023/B:RAQE.0000024991.65949.d6>
4. Рудаков К.И., Дмитриев П.Н., Барышев А.М., Худченко А.В., Хеспер Р., Кошелец В.П. Малошумящие СИС-приёмники для новых радиоастрономических проектов. *Известия вузов. Радиофизика*. 2019. Т.62. №7. С.613-622. <https://doi.org/10.1007/s11141-020-10001-7>
5. Балегга Ю.Ю. и др. Сверхпроводниковые приёмники для космических, аэростатных и наземных субтерагерцовых радиотелескопов. *Известия вузов. Радиофизика*. 2020. Т.63. №7. С.533-566.
6. Gordeeva A.V. et al. Record electron self-cooling in cold-electron bolometers with a hybrid superconductor-ferromagnetic nanoabsorber and traps. *Scientific Reports*. 2020. V.10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78869-z>

7. Кошелец В.П., Тарасов М.А. Сверхпроводниковые приемники терагерцевого диапазона для космических и аэростатных радиотелескопов. *Известия РАН. Серия физическая.* 2016. Т.80. №4. С.517-521.
<https://doi.org/10.7868/S0367676516040220>
8. Khaikin V.B. et al. On the Eurasian SubMillimeter Telescopes Project (ESMT). *7 Всероссийская Микроволновая Конференция.* Москва. 2020. С.47-51.
<https://doi.org/10.1109/RMC50626.2020.9312233>
9. Marchiori G., Rampini F., Spinola M., De Lorenzi S., Bressan R., Tordi M. Towards the Eurasian Sub-Millimeter Telescope (ESMT): concept outline and first results. *Всероссийская конференция «Наземная астрономия в России. XXI век».* Нижний Архыз. 2020. С.378-383. https://doi.org/10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_378
10. Duan R. et al. Toward Eurasian SubMillimeter Telescopes: the concept of multicolor subTHz MKID-array demo camera MUSICAM and its instrumental testing. *7 Всероссийская Микроволновая Конференция.* Москва. 2020. С.41-46.
<https://doi.org/10.1109/RMC50626.2020.9312270>
11. Лукин В.П., Канев Ф.Ю., Коняев П.А., Фортес Б.В. Численная модель адаптивной оптической системы. Часть 2. Датчики волнового фронта и исполнительные элементы. *Оптика атмосферы и океана.* 1995. Т.8. №3. С.419-428.
12. Nikolic B., Richer J., Hills R., Stirling A. Phase Correction for ALMA: Adaptive Optics in the Submillimetre. *The Messenger.* 2008. V.131. P.14-18.
13. Schloerb F.P., Carrasco L. Large Millimeter Telescope. *Proceedings of 25th URSI General Assembly.* Maastricht. 2002.
14. Quesada J.A. Precipitable water vapor content above Pico Veleta. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific.* 1989. V.101. №638. P.441-444.
<https://doi.org/10.1086/132454>

15. Greve A., Bremer M., Penalver J., Raffin P., Morris D. Improvement of the IRAM 30-m telescope from temperature measurements and finite-element calculations. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2005. V.53. №2. P.851-860. <https://doi.org/10.1109/TAP.2004.838785>
16. Заболотный В.Ф., Кардашев Н.С., Артеменко Ю.Н., Парщиков А.А., Шанин Г.И. Полноповоротный радиотелескоп РТ-70 на плато Суффа в Узбекистане: состояние и перспективы. *Всероссийская астрономическая конференция 2001*. Санкт-Петербург. 2001.
17. Shuster K. et al. NOEMA: a powerful millimeter wave interferometer using next generation technology. *Proceedings of SPIE 10700. Ground-based and Airborne Telescopes VII*. 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2313489>
18. Borovkov A.I., Shevchenko D.V., Gaev A.V., Gimmelman V.G., Machuev Y.I. finite-element modeling and thermal analysis of the RT-70 radio telescope main reflector. *4th International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT 2003*. Sevastopol. 2003. P.651-654. <https://doi.org/10.1109/ICATT.2003.1238827>
19. Greve A., Bremer M. Calculated thermal behavior of ventilated high precision radio telescopes. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2008. V.48. №3. P.9-19. <https://doi.org/10.1109/MAP.2006.1703393>
20. Bolli P. et al. Sardinia Radio Telescope: general description, technical commissioning and first light. *Journal of Astronomical Instrumentation*. 2015. V.4. №3-4. <https://doi.org/10.1142/S2251171715500087>
21. Монин Ю.Г. Определение упругих деформаций рефлектора радиотелескопа РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории АН СССР. *Известия КРАО*. 1970. Т.41-42. С.260-263.
22. Ефанов В.Ф. и др. Наблюдения радиоисточников на волне 3,9 мм. *Горьковский научно-исследовательский радиофизический институт. Препринт №55*. 1979.

23. Mangum J.G., Baars J.W.M., Greve A., Lucas R., Snel R., Wallace P.T., Evaluation of the ALMA Prototype Antennas. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2006. V.118. №847. P.1257-1301. <https://doi.org/10.1086/508298>
24. Duan R., Li Z., Zhang L., Liu C., Zhang X., Niu C., Li S., Di Li. KID based sub-millimeter instrument for Eurasian Sub-Millimeter Telescopes. *Всероссийская конференция «Наземная астрономия в России. XXI век»*. Нижний Архыз. 2020. С.384-389. https://doi.org/10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_384
25. Sayers J. et al. The status of MUSIC: the multiwavelength sub-millimeter inductance camera. *Proc. SPIE 9153. Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VII*. 2014. <https://doi.org/10.1117/12.20554>
26. Alvarez et al. Metrology and surface adjustment of primary reflector panels on the LMT. *Proc. SPIE 9151. Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation*. 2014. <https://doi.org/10.1117/12.2056859>
27. Яковлев С.В., Якунин В.В., Стороженко А.А., Бурсов Н.Н., Хайкин В.Б. Результаты геодезических измерений топографии поверхности и точности позиционирования щитов РАТАН-600 лазерным трекером API TRACKER 3. *Труды ИПА РАН*. 2012. №24. С.103-108.
28. Ripak A.M., Khaikin V.B., Lebedev M.K. Aperture field recovery of a reflector radio telescope using phase shifting holography. *7 Всероссийская Микроволновая Конференция*. Москва. 2020. С.162-166. <https://doi.org/10.1109/RMC50626.2020.9312237>
29. Butler B.J., Steffes P.G., Suleiman S.H., Jenkins J.M. Accurate and consistent microwave observations of Venus and their implications. *Icarus*. 2001. V.154. P.226-238. <https://doi.org/10.1006/icar.2001.6710>
30. Кузьмин А.Д. *Радиофизические исследования Венеры*. Москва, ВИНТИ. 1967. 175 с.

31. Bubnov G.M., Vdovin V.F., Khaikin V.B., Tremblin P., Baron P. Analysis of variations in factors of specific absorption of sub-terahertz waves in the Earth's atmosphere. *7 Всероссийская Микроволновая Конференция*. Москва. 2020. С.229-232. <https://doi.org/10.1109/RMC50626.2020.9312314>
32. Айвазян Г.М. *Распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн в облаках*. Ленинград, Гидрометеиздат. 1991. 479 с.
33. Chao-Lin Kuo. Assessments of Ali, Dome A, and Summit Camp for mm-wave observations using MERRA-2 Reanalysis. *Astrophysical Journal*. 2017. V.848. №1. P.4-11. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8b74>
34. Otarola A. et al. Precipitable Water Vapor, Temperature, and Wind Statistics At Sites Suitable for mm and Submm Wavelength Astronomy in Northern Chile. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2019. V.131. №988. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/aafb78>
35. Shikhovtsev A.Yu. et al. Astroclimatic characteristics of the Sayan Solar Observatory and the Special Astrophysical Observatory sites for ground-based mm/submm astronomy. *Международная конференция «Субмиллиметровая и миллиметровая астрономия: задачи и инструменты»*. Москва, АКЦ ФИАН. 2021.
36. Wang Y. et al. Evaluation of Precipitable Water Vapor from Four Satellite Products and Four Reanalysis Datasets against GPS Measurements on the Southern Tibetan Plateau. *Journal of Climate*. 2017. V.30. №15. P.5699-5713. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0630.1>
37. Кузовлев В.В., Станкевич К.С. Об эффективной высоте поглощения радиоволн сантиметрового диапазона в атмосферном кислороде атмосферы и водяном паре. *Известия вузов. Радиофизика*. 1964. Т.7. №1. С.46-50.
38. Cortés F. et al. Twenty years of PWV measurements in the Chajnantor Area. *Astronomy & Astrophysics*. 2020. V.640. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037784>

39. Radford S.J.E., Peterson J.B. Submillimeter Atmospheric Transparency at Maunakea, at the South Pole, and at Chajnantor. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2016. V.128. №965. P.1-13. <http://dx.doi.org/10.1088/1538-3873/128/965/075001>
40. Стоцкий А.А. Измерение флуктуаций разности фаз сантиметровых волн, распространяющихся в приземном слое атмосферы. *Радиотехника и электроника*. 1969. Т.14. №9. С.1547-1551.
41. Стоцкий А.А., Берлин А.Б., Кайдановский М.Н., Хайкин В.Б. О флуктуациях радиоизлучения безоблачной атмосферы на сантиметровых волнах. *Радиотехника и электроника*. 1986. Т.31. №10. С.1999-2002.
42. Maud L.T. et al. Phase correction for ALMA. Investigating water vapour radiometer scaling: The long-baseline science verification data case study. *Astronomy & Astrophysics*. 2017. V.605. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731197>
43. Wiedner M.C., Hills R.E., Carlstrom J.E., Lay O.P. Interferometric phase correction using 183 GHz water vapor monitors. *Astrophysical Journal*. 2001. V.553. №2. P.1036-1041. <https://doi.org/10.1086/320943>
44. Fried D.L. Statistics of a geometric representation of wavefront distortion. *Journal of the Optical Society of America*. 1965. V.55. №11. P.1427-1435. <https://doi.org/10.1364/JOSA.55.001427>
45. Татарский В.И. *Распространение волн в турбулентной атмосфере*. Москва, Наука. 1967. 548 с.
46. Парийский Ю.Н., Стоцкий А.А. О возможности получения радиоизображений небесных тел с разрешением выше 10^{-2} секунды дуги. *Известия ГАО АН СССР*. 1972. №188. С.195-212.
47. Emerson D.T., Klein U., Haslam C.G.T. A multiple beam technique for overcoming atmospheric limitations to single-dish observations of extended radio sources. *Astronomy & Astrophysics*. 1979. V.76. P.92-105.
48. Reichertz L.A., Weferling B., Esch W., Kreysa E. The fastscanning observing technique for millimeter and submillimeter astronomy. *Astronomy & Astrophysics*. 2001. V.379. №2. P.735-739. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20011227>

49. Weferling B., Reichertz L.A., Schmid-Burgk J., Kreysa E. Principles of the data reduction and first results of the fastscanning method for (sub)millimeter astronomy. *Astronomy & Astrophysics*. 2002. V.383. №3. P.1088-1099. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20011617>
50. Nosov V.I. et al. A dual-wave atmosphere transparency radiometer of the millimeter wave range. *Instruments and Experimental Techniques*. 2016. V.59. №3. P.374-380. <https://doi.org/10.1134/S0020441216020111>
51. Бубнов Г.М. и др. Результаты наблюдения астроклимата в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн на плато Суффа. *Известия вузов. Радиофизика*. 2016. Т.59. №8. С.852-861. <https://doi.org/10.1007/s11141-017-9745-7>
52. Lapinov A.V., Lapinova S.A., Petrov L.Yu. On the benefits of the Eastern Pamirs for sub-mm astronomy. *Proceedings of SPIE 11453. Millimeter, submillimeter, and far-infrared detectors and instrumentation for astronomy X*. 2020. <https://doi.org/10.1117/12.2560250>
53. Агафонов М.И. и др. Результаты наблюдений астроклимата на Крымском полуострове в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн. *Астрофизический бюллетень*. 2018. Т.73. №3. С.412-417.
54. Бубукин И.Т. и др. Анализ результатов исследования астроклимата на радиоастрономической станции «Кара-Даг» в Крыму и возможностей уменьшения влияния атмосферы на радиоастрономические наблюдения в миллиметровом диапазоне. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2019. Т.156. №1(7). С.43-55. <https://doi.org/10.1134/S0044451019070058>
55. Горбунова Т.Ю. Оценка территории Юго-Восточного Крыма для использования систем солнечной энергетики. *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2015. Т.1(11). №4. С.49-60.
56. Миронова Л.Г., Шатко В.Г. Полуостров Меганом в Юго-Восточном Крыму (природные условия, флора, растительность). *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2013. Т.9. №2-2. С.26-64.

57. *Ландшафтно-геофизические условия произрастания (ЛГУП) лесов юго-восточной части горного Крыма*. Симферополь, Таврия-Плюс. 2001. 136 с.
58. *Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 10. Книга 1*. Ленинград, Гидрометеиздат. 1990. 605 с.
59. *Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 10. Книга 2*. Ленинград, Гидрометеиздат. 1990. 320 с.
60. *Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 13*. Ленинград, Гидрометеиздат. 1990. 725 с.
61. Nakariakov V.M., Melnikov V.F. Quasi-Periodic Pulsations in Solar Flares. *Space Science Reviews*. 2009. V.149. №1-4. P.119-151. <https://doi.org/10.1007/s11214-009-9536-3>
62. Morin G.P. A simple circular polarization selective surface. *International Symposium on Antennas and Propagation Society, Merging Technologies for the 90's*. 1990. V.1. P.100-103. <https://doi.org/10.1109/APS.1990.115058>
63. Khaikin V.B., Luukanen A. Expected Characteristics of Multibeam Solar Radio Telescope with Focal Plane Array at 100 GHz. *3rd ESA Workshop on Millimetre Wave Technology and Applications*. Espoo, Finland. 2003. P.419-424.
64. Woody D. et al. The CCAT 25 m diameter submillimeter-wave telescope. *Proceedings of SPIE 8444. Ground-based and Airborne Telescopes IV*. 2012. <https://doi.org/10.1117/12.925229>
65. Klaassen P. D. et al. The Atacama Large Aperture Submillimeter Telescope (AtLAST). *Proceedings of SPIE 11445, Ground-based and Airborne Telescopes VIII*. 2020. <https://doi.org/10.1117/12.2561315>
66. Шиховцев А.Ю., Киселев А.В., Коваadlo П.Г., Колобов Д.Ю., Лукин В.П., Томин В.Е. Метод определения высот турбулентных слоев в атмосфере. *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т.32. №12. С.994-1000. <https://doi.org/10.15372/AOO20191208>

67. Ковадло П.Г., Лукин В.П., Шиховцев А.Ю. Развитие модели турбулентной атмосферы на астроплощадке Большого солнечного вакуумного телескопа в приложении к адаптации изображений. *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т.31. №11. С.906-910. <https://doi.org/10.15372/AOO20181108>
68. Shikhovtsev A.Yu., Kovadlo P.G., Lukin V.P. Temporal variations of the turbulence profiles at the Sayan Solar Observatory Site. *Atmosphere*. 2019. V.10. №9. P.499. <https://doi.org/10.3390/atmos10090499>
69. Лукин В.П. Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики. *Успехи физических наук*. 2014. Т.184. №6. С.599-640. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0184.201406b.0599>
70. Noll R.J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence. *Journal of the Optical Society of America*. 1976. V.66. №3. P.207-211. <https://doi.org/10.1364/JOSA.66.000207>
71. B. Nolic. Interference of coefficients for Use in Phase Correction I. *ALMA Memo #587*. 2009. P.1-16.
72. Pardo J.R., Cernicharo J., Serabyn E. Atmospheric Transmission at Microwaves (ATM): An Improved Model for mm/submm applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2001. V.49. №12. P.1683-1694. <https://doi.org/10.1109/8.982447>
73. Zauderer B.A. et al. The CARMA paired antenna calibration system: atmospheric phase correction for millimeter wave interferometry and its application to mapping the ultraluminous galaxy ARP 193. *Astronomical Journal*. 2016. V.151. <https://doi.org/10.3847/0004-6256/151/1/18>
74. Waters J.W. Absorption and emission by atmospheric gases. *Methods of Experimental Physics. V. 12. Part B (Astrophysics: Radio Telescopes)*. 1976. P.142-176. [https://doi.org/10.1016/S0076-695X\(08\)60684-5](https://doi.org/10.1016/S0076-695X(08)60684-5)
75. Olmi L. The Effects of the Atmosphere. *Single-Dish Radio Astronomy: Techniques and Applications. ASP Conference Series. V. 278*. San Francisco, CA, Astronomical Society of the Pacific. 2002.

Для цитирования:

Хайкин В.Б., Шиховцев А.Ю., Шмагин В.Е., Лебедев М.К., Копылов Е.А., Лукин В.П., Ковадло П.Г. О проекте евразийских субмиллиметровых телескопов (ESMT) и возможности применения адаптивной оптики для улучшения качества субмм изображений. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.9>

