

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ АСТРОКЛИМАТА НА РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «КАРА-ДАГ» В КРЫМУ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРЫ НА РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

И. Т. Бубужин^{a*}, *И. В. Ракуть*^{a,c}, *М. И. Агафонов*^{a,c}, *А. Л. Панкратов*^{a,b,c},
А. В. Троицкий^a, *В. А. Лапченко*^d, *Р. В. Горбунов*^e,
И. И. Зинченко^{a,b}, *В. И. Носов*^b, *В. Ф. Вдовин*^{b,c}

^a Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского
603950, Нижний Новгород, Россия

^b ФИЦ Институт прикладной физики Российской академии наук
603950, Нижний Новгород, Россия

^c Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
603950, Нижний Новгород, Россия

^d Карадагская научная станция им. Т. И. Вяземского — природный заповедник Российской академии наук
298188, Феодосия, Россия

^e Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского Российской академии наук
299011, Севастополь, Россия

Поступила в редакцию 13 августа 2018 г.,
после переработки 29 марта 2019 г.
Принята к публикации 29 марта 2019 г.

Представлены результаты исследования астроклимата на радиоастрономической станции «Кара-Даг» в Крыму с 22 июля по 21 сентября 2017 г. Проведен анализ алгоритмов обработки данных, полученных методом атмосферных разрезов. Показано, что широкие полосы приемников прибора МИАП-2 приводят к некоекансной зависимости антенных температур от угла визирования. Оптимальным является вычисление поглощения по трем зенитным углам методом наименьших квадратов и опорной области с яркостной температурой, близкой к температуре воздуха. Рассмотрены закономерности изменения параметров прозрачности атмосферы и их связи с климатическими особенностями места наблюдений. Показано, что существующая атмосферная циркуляция создает на территории станции «Кара-Даг» благоприятные условия для ночных астрономических наблюдений в миллиметровом диапазоне длин волн. Предложены альтернативные и более дешевые, по сравнению с существующими тенденциями, подходы к уменьшению влияния атмосферной влаги на измерения в этом диапазоне. Первый заключается в выборе места размещения в зоне с подходящей розой ветров и рельефом, приводящим к замещению влажного теплого воздуха холодным и сухим, например, в зонах действия таких местных ветров, как бора. Второй предполагает введение измерений параметров атмосферы радиометрическими методами и учет их влияния в реальном масштабе времени. Полученные результаты основываются на ограниченной статистике, поэтому являются предварительными и стимулируют дальнейшие систематические измерения на Карадаге.

DOI: 10.1134/S0044451019070058

1. ВВЕДЕНИЕ

* E-mail: bubn@nirfi.unn.ru

В настоящее время активно развиваются радиоастрономические исследования в миллиметровом и

субмиллиметровом диапазоне длин волн как с космических аппаратов, так и с поверхности Земли [1, 2]. Однако на территории Российской Федерации (РФ) до сих пор практически не имеется инструментов для исследований на длинах волн короче 3 мм (за исключением 7.5-метровой антенны МГТУ им. Баумана под Москвой, которая используется для исследования Солнца на длинах волн до 2 мм [3]). Актуальной задачей является также поиск мест для наземного плеча будущей миссии «Миллиметр» — радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) [4]. Рассматриваются различные варианты территориального размещения соответствующих радиотелескопов. Претендентом на исполнение главной роли на территории бывшего СССР является основной инструмент обсерватории на плато Суффа (высота 2400 м над уровнем моря) — радиотелескоп с 70-метровым основным рефлектором РТ-70 проекта П-2500, находящийся за пределами РФ (Республика Узбекистан). Размещение инструментов коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн высоко в горах является наиболее распространенным подходом в настоящее время, к нему можно отнести и плато Суффа. Другой вариант — использование мест с холодным климатом — радиотелескоп миллиметрового диапазона установлен даже в Антарктиде. Поэтому вопрос разработки более дешевых альтернативных концепций развития миллиметровой радиоастрономии весьма актуален.

Причиной строительства инструментов в гористой местности или в зонах с холодным климатом является существенное поглощение излучения коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов атмосферными газами [5] и, в первую очередь, парами воды и молекулярным кислородом. Поглощение подвержено значительным сезонным и суточным вариациям и зависит от климатических особенностей местности и высоты над уровнем моря. Наиболее достоверным способом определения степени влияния атмосферы на радиоастрономические наблюдения является проведение регулярных измерений интегрального атмосферного ослабления в окнах прозрачности атмосферы на частотах, близких к рабочим частотам радиотелескопа, а также темпа и амплитуды вариаций задержки распространения сигнала, который важен для проведения РСДБ-экспериментов.

Поскольку основное содержание влаги в атмосфере приходится на пограничный слой $\Delta h \approx 2.5$ км, определяющим является локальный климат конкретной территории, который в значитель-

ной степени может минимизировать влияние атмосферного поглощения. Поэтому альтернативная концепция может заключаться в выборе места со специфической розой ветров, доставляющей сухой воздух к месту установки инструмента. Подобный подход был применен при строительстве 64-метрового радиотелескопа на Сардинии (Италия), расположенного на высоте всего 600 м над уровнем моря и предназначенного для работы до длины волны 3 мм. При выборе места установки был учтен засушливый климат Сардинии. В 1930-х гг. на территории СССР проводились исследования поглощения атмосферы с целью определения местоположения для создания южной обсерватории [6]. По результатам исследований была выбрана местность вблизи Старого Крыма, но постройке обсерватории помешала война. В середине 1960-х гг. в 13 км от Старого Крыма у подножия горы Балалы-Кая Карадагского горного массива была создана радиоастрономическая станция (РАС) «Кара-Даг» Научно-исследовательского радиофизического института [7]. Карадагский горный массив [8] является одним из самых засушливых районов горного Крыма (и России), что дает основание ожидать низкое интегральное влагосодержание и как следствие низкое поглощение волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Для проверки этого в 2017 г. исследования астроклимата проводились на территории Крымского полуострова на РАС «Кара-Даг». Предварительные результаты обработки этих наблюдений опубликованы в работе [9].

Целью данной работы является оценка целесообразности и перспектив проведения на территории РАС «Кара-Даг» радиоастрономических наблюдений в окнах прозрачности миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. В разд. 2 приведены характеристики измерительного комплекса для определения параметров атмосферного поглощения на длинах волн 2 и 3 мм, использованного на данном этапе работы. В разд. 3 проведен критический анализ использованного аппаратного комплекса и методик измерений, что позволяет улучшить качество получаемых данных исследований астроклимата на РАС «Кара-Даг», а в дальнейшем создать более совершенную радиометрическую систему для проведения круглогодичных атмосферных измерений. В разд. 4 проанализированы результаты, полученные на данном этапе исследований астроклимата с использованием имеющегося аппаратного комплекса и ограниченные летними условиями измерений. Показана связь атмосферного поглощения на РАС «Кара-Даг» с клима-

тическими особенностями местоположения станции. В разд. 5 анализируются методики получения интегральной влажности атмосферы радиометрическим методом и возможности уменьшения влияния атмосферы на радиоастрономические наблюдения в миллиметровом диапазоне. В Заключении сформулированы выводы.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Измерительный комплекс МИАП-2 представляет собой радиометрическую систему в общем корпусе, включающую два радиометра с рабочими диапазонами 84–99 ГГц и 132–148 ГГц с рупорно-линзовыми антеннами, имеющими диаграммы направленности 2.5° , опорно-поворотное устройство и систему управления, сбора и обработки данных. Комплекс позволяет определить оптическую толщину атмосферы в окнах прозрачности вблизи 2 и 3 мм при помощи метода атмосферных разрезов. Структура и принцип действия комплекса МИАП-2 подробно описаны в работе [10].

Для определения полного вертикального поглощения в атмосфере комплекс МИАП-2 устанавливался на крышу аппаратного домика РАС «Кара-Даг» на высоту 6 м от поверхности земли, что соответствовало 105 м от уровня моря. В автоматическом режиме поворотом плоского зеркала осуществлялось циклическое (по 2 мин) сканирование диаграмм направленности антенн радиометров в секторе зенитных углов от 0 до 88.6° в вертикальной плоскости, проходящей через открытую область пространства над кромкой горизонта моря. На углах $\theta_1 = 60.5^\circ$, $\theta_2 = 76.3^\circ$, $\theta_3 = 81.4^\circ$, $\theta_4 = 84.2^\circ$, $\theta_5 = 88.6^\circ$ поворот антенн останавливался на равные интервалы времени (4 с) для накопления информации о яркостной температуре атмосферы. Сигнал с радиометров через аналого-цифровое устройство записывался в память компьютера для дальнейшей обработки.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АТМОСФЕРНЫХ РАЗРЕЗОВ

Метод атмосферных разрезов применим только для плоско-слоистой модели атмосферы. В этом случае яркостная температура атмосферы равна

$$T_b(\theta) = T_{mean} \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\cos\theta}\right) \right] + 2.73 \exp\left(-\frac{\tau}{\cos\theta}\right), \quad (1)$$

где τ — полное вертикальное поглощение в атмосфере, T_{mean} — средневзвешенная по коэффициенту поглощения температура атмосферы, вторая компонента связана с реликтовым космическим излучением. Вклад второй компоненты в рамках данной задачи незначителен.

Все алгоритмы обработки данных, полученных методом атмосферных разрезов, основаны на использовании безразмерных отношений приращений сигналов на выходе радиометрического приемника. Сигнал на выходе радиометра равен

$$d(\theta) = kT_b(\theta) + A, \quad (2)$$

где k и A — калибровочные коэффициенты. Например, для углов $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$ в модели плоско-слоистой атмосферы из выражения (1) получим независимое от k и A соотношение

$$Y(\tau) = \frac{d(\theta_2) - d(\theta_1)}{d(\theta_3) - d(\theta_2)} = \frac{T_b(\theta_2) - T_b(\theta_1)}{T_b(\theta_3) - T_b(\theta_2)} = \frac{\exp(-\tau/\cos\theta_2) - \exp(-\tau/\cos\theta_1)}{\exp(-\tau/\cos\theta_3) - \exp(-\tau/\cos\theta_2)}. \quad (3)$$

Были проанализированы два метода получения атмосферного поглощения по атмосферному разрезу.

Метод 1. Вычисление поглощения путем измерений на трех углах [11]

В этом случае выражение (3) представляет собой трансцендентное уравнение относительно τ , которое может быть решено, например, графическим способом. Для определения полного вертикального поглощения τ в атмосфере методом итераций уравнение (3) преобразуется к виду

$$\tau = \frac{1}{1/\cos\theta_3 - 1/\cos\theta_2} \ln \left\{ \frac{d(\theta_2) - d(\theta_1)}{d(\theta_3) - d(\theta_2)} \times \frac{\exp[\tau(1/\cos\theta_3 - 1/\cos\theta_2)] - 1}{\exp[\tau(1/\cos\theta_2 - 1/\cos\theta_1)] - 1} \right\}. \quad (4)$$

При выборе углов таким образом, чтобы

$$\frac{1}{\cos\theta_3} - \frac{1}{\cos\theta_2} = \frac{1}{\cos\theta_2} - \frac{1}{\cos\theta_1},$$

величина τ определяется из соотношения

$$\tau = \frac{1}{1/\cos\theta_3 - 1/\cos\theta_2} \ln \frac{d(\theta_2) - d(\theta_1)}{d(\theta_3) - d(\theta_2)}. \quad (5)$$

В данном случае значения углов фиксированы, поэтому трансцендентное уравнение (4) решалось методом последовательных приближений. Количество циклов для достижения точности 10^{-5} не превышало 10. В данном методе не используются измерения на углах θ_4 и θ_5 , поскольку они находятся в области углов, где измеряемая величина не подчиняется модели плоско-слоистой атмосферы.

Метод 2. Вычисление поглощения по двум углам и опорной области с яркостной температурой, близкой к температуре приземного воздуха

В этом случае в уравнении (3) вместо излучения атмосферы на одном из углов используется излучение опорной области с яркостной температурой, близкой к температуре приземного воздуха. Тогда атмосферное поглощение определяется из соотношения [12, 13]

$$\tau = \frac{1}{1/\cos\theta_2 - 1/\cos\theta_1} \ln \frac{d_0 - d(\theta_1)}{d_0 - d(\theta_2)} + \Delta, \quad (6)$$

где d_0 , $d(\theta_1)$, $d(\theta_2)$ — показания радиометра при антенне, направленной на опорную область с яркостной температурой T_0 (температура приземного воздуха) и участки небосвода с зенитными углами θ_1 и θ_2 . В данном случае в качестве опорной области при измерениях использовалось излучение атмосферы с зенитным углом $\theta_5 = 88.6^\circ$ как наиболее близкое к излучению черного тела с температурой приземного воздуха [10]. Второй член, Δ , является поправкой на неизотермичность атмосферы. В работе [13] приведен алгоритм нахождения τ с учетом этой поправки методом последовательных приближений. Так как в данном случае яркостная температура опорной области меньше температуры приземного воздуха, сходимость предлагаемого алгоритма [13] нарушается, и эта поправка не вводилась.

Поглощение вычислялось для трех возможных комбинаций углов: θ_1 и θ_2 ; θ_1 и θ_3 ; θ_2 и θ_3 . По ним вычислялись среднее поглощение и дисперсия.

Среднее поглощение и ошибку измерений позволяет получить другой вариант этого метода в сочетании с методом наименьших квадратов и преобразованием выражения (1) к виду

$$T_{mean} - T_b(\theta) = T_{mean} \exp\left(-\frac{\tau}{\cos\theta}\right). \quad (7)$$

После логарифмирования соотношения (7) с использованием в качестве T_{mean} излучения атмосферы с зенитным углом $\theta_5 = 88.6^\circ$ получим

$$\ln [d(\theta_5) - d(\theta)] = -\frac{\tau}{\cos\theta} + \ln(kT_{mean}). \quad (8)$$

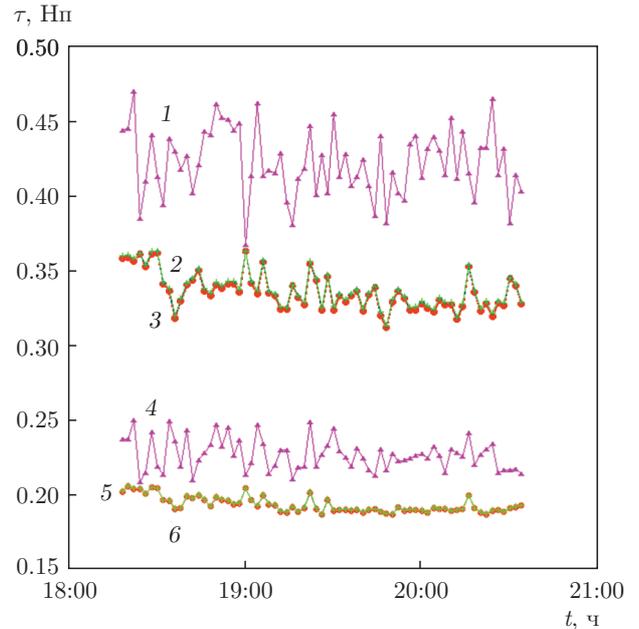


Рис. 1. (В цвете онлайн) Атмосферные поглощения в зените (в непах), полученные по измерениям на длине волны 2 мм методами трех углов без привязки к опорной области (лиловый, треугольники, кривая 1), двух углов и θ_5 (зеленый, крестики, 2), наименьших квадратов по трем углам и θ_5 (оранжевые точки, 3), а также на длине волны 3 мм теми же методами (соответственно кривые 4, 5 и 6)

Соотношение (8) линейно по τ , что позволяет для его определения применить метод наименьших квадратов [14]. В данных измерениях для обработки использованы углы θ_1 , θ_2 , θ_3 . Получены оптимальное значение поглощения и ошибка измерений.

На рис. 1 приведены результаты обработки трехчасовой записи 03.08.2017 рассмотренными методами для длин волн 2 и 3 мм. Из представленных результатов видно, что они делятся на две группы. Методы, использующие излучение атмосферы при угле θ_5 как опорную область, и метод, использующий кривизну зависимости на трех промежуточных углах без привязки к опорной области, дают существенно разные результаты. Анализ данных измерений показал, что причиной этих расхождений является различие между измеренной зависимостью яркостной температуры атмосферы $T_b(\theta)$ для зенитных углов θ и соотношением (1). Так, зависимости $T_b(\theta)$ для промежуточных углов θ от 0 до 80° соответствует величина τ_1 , а для углов $\theta > 80^\circ$ — $\tau_2 \neq \tau_1$. Поэтому методы, которые используют только промежуточные углы, где кривизна зависимости $T_b(\theta)$ меньше (что соответствует большим τ), дают большие значения, чем методы с привязкой к опорной области вблизи горизонта.

Возможно, основной причиной отличия зависимости $T_b(\theta)$ от соотношения (1) являются широкие полосы приемников в приборе МИАП-2 (15 ГГц для длины волны 3 мм и 2 зеркальных канала по 4 ГГц для длины волны 2 мм). Атмосферное поглощение в пределах полосы прибора меняется приблизительно в 1.5 раза [15–17], что и приводит к некоекансной зависимости $T_b(\theta)$. Поэтому оптимальным представляется использование метода 2 с вычислением поглощения по трем углам методом наименьших квадратов и опорной области с яркостной температурой, близкой к температуре воздуха. Дальнейшие результаты приведены в рамках этого подхода. Для проведения РСДБ-экспериментов важны не только величины поглощения и тропосферной задержки сигналов, но также темп и амплитуда вариаций (спектров флуктуаций) задержки распространения сигнала. Как видно на рис. 1, данные о поглощении (а следовательно, и о тропосферной задержке сигнала) представлены с временным интервалом 2 мин, что определяется конструкцией прибора МИАП-2. Для получения высокочастотной части спектра флуктуаций тропосферной задержки, необходимой для использования в РСДБ-экспериментах, может быть реализована комбинированная методика измерений, в которой метод разрезов применяется для абсолютной калибровки, а атмосферное поглощение определяется по яркостной температуре атмосферы с временным масштабом, равным постоянной времени радиометра [18]. Дальнейшие измерения будут проводиться новым измерительным комплексом, который создается с учетом опыта эксплуатации прибора МИАП-2, с введением, в том числе, и этой методики.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ И ИХ СВЯЗЬ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ ОСОБЕННОСТЯМИ В МЕСТЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «КАРА-ДАГ»

Карадагский горный массив [8] расположен на морском побережье и имеет специфическую конфигурацию с образованием полузамкнутых областей, с изменением высот и набором горных хребтов, которые в основном расположены вдоль побережья в несколько рядов. Эта конфигурация создает разнообразие климатических условий. РАС «Кара-Даг»

находится у границы заповедника и защищена от моря с востока двумя грядами гор. Сочетание особенностей атмосферной циркуляции над Карадагским массивом, расположенным на границе моря и суши, обуславливает значительные величины солнечной радиации при сравнительно малой облачности. На Карадаге преобладают ветры северных направлений, несущие сухой холодный воздух с равнинного Крыма. В течение года их повторяемость превышает 60 % [8]. При вторжениях масс холодного воздуха, которые, переваливая через невысокий хребет, сравнительно мало нагреваются адиабатически и с большой скоростью «падают» по подветренному склону под действием градиента давления и силы тяжести, высушивая атмосферу, формируется местный ветер бора, что определяет высокую прозрачность атмосферы. Такие условия не единичны и широко представлены в зонах контакта горных гряд и морского побережья (например, в Новороссийске, Геленджике и на Байкале).

В отличие от Новороссийского бора, местные ветры, дующие в окрестности РАС «Кара-Даг», расположенной вверху долины, спадающей к морю от перевала высотой около 200 м, не характеризуются высокими скоростями (скорость 1–7 м/с), поскольку формируется наложение бора, горно-долинной и бризовой циркуляций. Повторяемость ветров северных направлений возрастает ночью и уменьшается днем. Это является важным для ночных радиоастрономических наблюдений. Юго-восточный берег Крыма, находящийся в циркуляционной тени от Главной гряды Крымских гор, является одним из самых засушливых районов РФ, о чем свидетельствуют, например, отсутствие рек с постоянным стоком и характер растительности. Несмотря на то что в среднем за год на Карадаге бывает около 100 дней с осадками, заповедник является одним из самых сухих районов как Горного Крыма, так и РФ. Среднегодовое количество осадков на Карадаге за период наблюдений составляет 300–400 мм в год [8], что на территории РФ сравнимо с ситуацией только на границе с Казахстаном и Якутией. По сравнению с другими местами Крыма среднегодовое количество осадков на Карадаге в 1.6 раза меньше, чем в Ялте, и в 1.3 раза меньше, чем в Феодосии. Это дает основание ожидать в данных условиях и низкое влагосохранение в интегральном столбе, и, как следствие, низкое поглощение волн короче 3 мм.

В 2017 г. исследования астроклимата проводились на территории Крымского полуострова, на РАС «Кара-Даг». Несмотря на небольшую высоту (105 м основная площадка и 140 м верхняя пло-

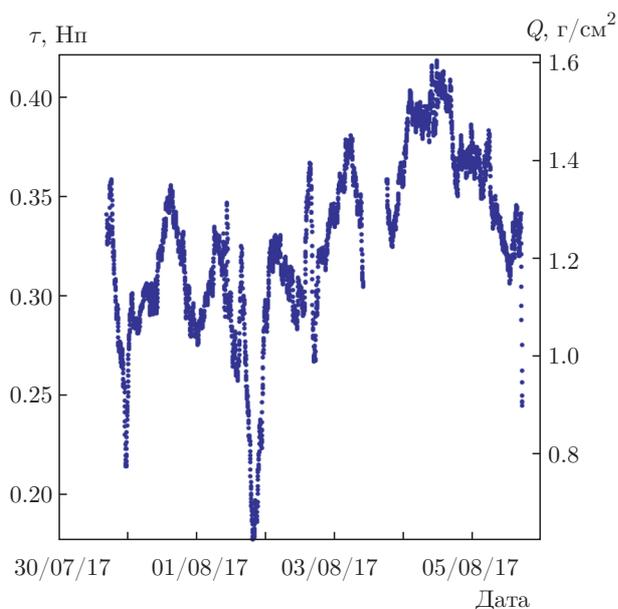


Рис. 2. Ряд значений поглощения на канале 2 мм (левая шкала) с 30 июля по 6 августа 2017 г. Наблюдаются суточные вариации атмосферного поглощения со спадом поглощения в ночное время суток. Показаны интегральные содержания Q водяного пара (правая шкала), измеренные радиометрическим методом по поглощению на данном канале

щадка) расположения над уровнем моря, подтверждением целесообразности создания в 1966 г. РАС «Кара-Даг» явилось множество проведенных научных работ [7], включающих измерения радиоизлучения космических объектов с поверхности Земли на длинах волн вплоть до 8 мм. В связи с перечисленным выше было высказано предположение, что исследовательская площадка РАС «Кара-Даг» может послужить для наблюдения космоса и его объектов также и в коротковолновом диапазоне миллиметрового спектра. Для проверки такой возможности и проводились измерения астроклимата на территории РАС «Кара-Даг». Предварительные результаты обработки этих наблюдений опубликованы [9].

Радиометрический комплекс был запрограммирован на измерение атмосферной оптической толщины каждые 2 мин, при этом одно измерение занимает около 50 с. Таким образом, получены записи динамики атмосферного поглощения во времени в двух окнах прозрачности атмосферы. Полные данные атмосферных поглощений на длинах волн 2 и 3 мм с 22 июля по 21 сентября 2017 г. на РАС «Кара-Даг» приведены в работе [9]. На рис. 2 для анализа характера зависимости атмосферного поглощения τ

от метеоусловий и времени суток представлен ряд значений поглощения на канале 2 мм (частота $\nu = 140$ ГГц) с 30 июля по 6 августа 2017 г. Пропуски в данных вызваны как сменой точек наблюдения, так и отключением электричества на РАС «Кара-Даг». Измерения, проведенные 3 августа на верхней площадке РАС «Кара-Даг» (высота 140 м), не выявили существенных отличий от данных с нижней площадки. Уровень поглощения за время измерений составил 0.14–0.16 Нп на канале 3 мм.

На рис. 2 наблюдаются суточные вариации атмосферного поглощения. Видно, что спады поглощения приходятся на ночное время суток. Ясное (без видимых облачных образований) дневное время характеризуется малым разбросом точек величиной до 0.1 Нп. С появлением облачности не выполняются условия применимости плоско-слоистой модели атмосферы, принятой в методе «разрезов», в результате чего появляется заметный разброс точек. В период выпадения осадков (дождя) прибор продолжал работать, однако поскольку астрономические измерения в такую погоду не проводятся, соответствующие данные при анализе исключались. Из-за сравнительно небольшого вклада таких периодов, даже несмотря на нетипично влажный сезон лета 2017 г. в Крыму, влияние сильной облачности и осадков в статистической оценке атмосферного поглощения не являлось существенным.

На рис. 3 в качестве примера представлены азимутальные зависимости атмосферного поглощения в радиометрических каналах 3 и 2 мм. По радиальной оси отложено атмосферное поглощение, по азимутальной — направление, откуда дует ветер в районе расположения прибора МИАП-2 с 29 июля по 2 августа 2017 г. Наблюдение погодных условий осуществлялось как на Карадагской метеостанции, расположенной на берегу моря в той же долине вблизи РАС «Кара-Даг», так и на Карадагской станции фоновое экологического мониторинга с использованием метеостанции Тропосфера-Н, расположенной в соседней долине на восточном склоне г. Святая. При этом отсутствие ветра (штиль, когда влага приходит с моря) задается как 90° (что соответствует восточному ветру, который также гонит влагу с моря), чтобы не путать с северным ветром. На графике видно, что при северных, северо-западных ветрах поглощение в обоих каналах падает.

Это же явление наблюдается при эффекте резкого уменьшения поглощения, показанного на рис. 4. На рис. 4 приведены временные зависимости атмосферного поглощения в канале 3 мм и направления А, откуда дует ветер. Эффект связан с существен-

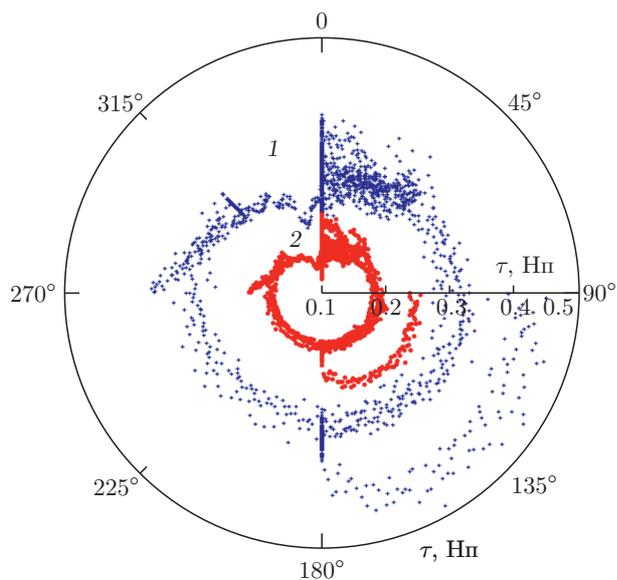


Рис. 3. (В цвете онлайн) Азимутальная зависимость атмосферного поглощения в радиометрических каналах 3 мм (красные точки 2) и 2 мм (синие крестики 1). По радиальной оси отложено атмосферное поглощение, по азимутальной — направление, откуда дует ветер в районе измерений с 29 июля по 2 августа 2017 г. Нуль соответствует северному направлению

ным падением влагосодержания в атмосфере, когда поглощение начинает определяться не влагой, а кислородом. Явление наблюдалось с 19 по 21 сентября на протяжении длительного временного интервала около 8 ч, при этом скорость ветра не превышала 7–8 м/с. По совместной динамике на графиках рис. 4 видно, что в течение 19 сентября при постепенном ослаблении южного ветра поглощение в обоих каналах плавно падает, затем вечером 19 сентября резко меняется ветер на практически северный и удерживается близким к северному до утра 20 сентября. За это время поглощение резко падает с задержкой после изменения направления и скорости ветра. После смены направления ветра на южное в первой половине 20 сентября с некоторым запозданием поглощение увеличивается.

Таким образом, при сравнении данных о направлении ветра и поглощении атмосферы в канале 3 мм наблюдается корреляция, подтверждающая факт, что при смене направления ветра на северное с некоторой задержкой падает поглощение. Наблюдения показывают, что при штиле или же ветре с моря (с юга), происходит повышение влажности, что можно объяснить накоплением влаги в «полумесяце» хребтов вокруг полигона, т. е. ее накоплением и над по-

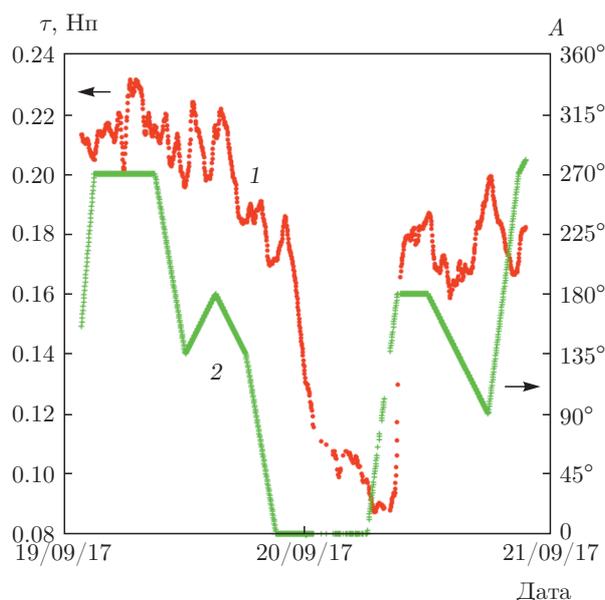


Рис. 4. (В цвете онлайн) Графики измерения атмосферного поглощения для длины волны 3 мм (красные точки 1) и направления A , откуда дует ветер (зеленые крестики 2) с 19 по 21 сентября 2017 г. на РАС «Кара-Даг». Нуль соответствует северному направлению. На протяжении временного интервала около 8 ч наблюдается резкое снижение поглощения для длины волны 3 мм. При смене направления ветра на северный с некоторой задержкой по времени падает поглощение

лигоном. Если же ветер дует с севера (со степного Крыма), то, огибая сверху вершины обрамляющего полигон массива Балалы-Кая, он выдувает влагу на море и не позволяет вернуться назад, поэтому влажность уменьшается. Для восточных и западных направлений все сложнее, но с востока два хребта Кара-Дага мешают влаге проникать на полигон, а западный ветер, попадая на эти хребты, сворачивает на юг к открытому морю и выдувает влагу в море, но сила его меньше, чем у северного. Таким образом, преобладание именно на Карадаге северного ветра вообще и в ночное время, в частности [8, 19], даже если днем ветер дует с юга, создает на территории РАС «Кара-Даг» благоприятные условия для ночных астрономических наблюдений.

Статистической характеристикой повторяемости измеренных значений поглощения атмосферы в диапазонах 2 и 3 мм являются гистограммы. Такие статистические характеристики в виде гистограмм приведены в работе [9] для измерений поглощения атмосферы в диапазонах 2 и 3 мм на РАС «Кара-Даг», на РАС «Бадары» и для измерений за тот же период

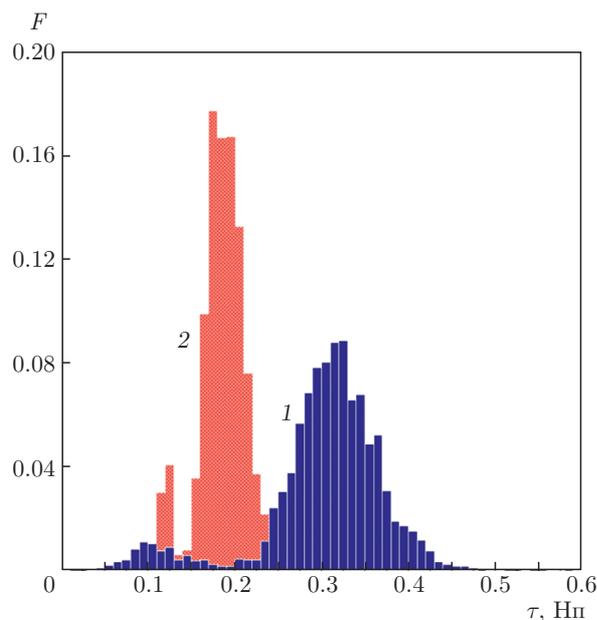


Рис. 5. (В цвете онлайн) Гистограммы измеренных значений поглощения в атмосфере для длины волны 2 мм (синие 1) и 3 мм (красные 2) с двумя максимумами при северном ветре и в отсутствие облачности за период с 17.09.2017 по 21.09.2017. Гистограммы $F(\tau)$ построены по 3181 измерению с усреднением по $\tau = 0.01$

таким же прибором МИАП на международной радиоастрономической обсерватории (МРАО) «Суффа». Из статистики наблюдений сделан вывод о преимуществе измерений в МРАО «Суффа» по сравнению с измерениями на двух других площадках наблюдения, а также о том, что у РАС «Кара-Даг» имеются лучшие показатели в сравнении с РАС «Бадары», несмотря на ее более низкое расположение по высоте над уровнем моря и погодные аномалии лета 2017 г.

Исходя из описанного выше специфического расположения РАС «Кара-Даг» в горном массиве и розы ветров на Крымском полуострове был проведен более детальный анализ связи гистограмм атмосферного поглощения на РАС «Кара-Даг» с метеоусловиями. Анализ показал, что при северных ветрах и ясном небе характер гистограмм может существенно отличаться от типичных унимодальных, приведенных в работе [9]. При северном ветре и отсутствии облачности гистограммы имеют два максимума как на рис. 5 за период с 17.09.2017 по 21.09.2017. Гистограммы $F(\tau)$ в диапазонах 2 и 3 мм на рис. 5 построены по 3181 измерению, с усреднением по $\tau = 0.01$. При этом помимо появления до-

полнительных максимумов при малом поглощении наблюдается уменьшение поглощения и в основных максимумах в обоих каналах примерно на 0.05 Нп. Сравнение величин поглощения в боковых максимумах на рис. 5 с гистограммами измерений поглощения в МРАО «Суффа» [9] показывает, что при северных ветрах и ясном небе условия наблюдений для РАС «Кара-Даг» и для МРАО «Суффа» (высота 2.4 км над уровнем моря) сравнимы. Как уже отмечалось, измерения на РАС «Кара-Даг» летом 2017 г. проводились в условиях погодной аномалии, при частых дождях и грозах. Для стандартных погодных условий Крымского лета — низкой влажности и отсутствии дождей — ситуации, описываемые рис. 5, будут, наблюдаться в большем числе случаев, что является стимулом продолжить наблюдения астроклимата на РАС «Кара-Даг» в последующие сезоны, когда погодные условия будут более типичными для данных мест.

Очевидно, что представленные результаты измерений атмосферного поглощения, основанные на ограниченной статистике, являются предварительными и требуют дальнейшего более глубокого и длительного анализа. Однако подтверждением сухого климата в данном регионе являются данные многолетних метеорологических измерений, имеющиеся в литературе. В частности, аномально дождливое лето 2017 г. не является свидетельством изменения климатических условий. Такие погодные аномалии наблюдались на Карадаге и ранее и являются довольно редким явлением. По данным [8] в XX столетии самым влажным был 1968 г. Кроме того, в числе наиболее дождливых называют 1935, 1973, 1976, 2002, 2005 гг. Хотя в последние годы выражен тренд в направлении увеличения повторяемости среднегодовых температур, превышающих среднестатистическое значение на 1–2 °С, и отмечено возрастание среднегодового количества осадков [8], величина этих изменений невелика по сравнению с естественной изменчивостью этих метеопараметров. По этой причине по результатам спектрального анализа многолетних рядов измерений солнечной инсоляции на Карадаге в работе [19] сделан вывод, что «в области низких частот (больших периодов) намечаются следы регулярных колебаний, которые не могут быть достоверно определены из-за ограниченной длительности временного интервала определения данных и небольших амплитуд этих колебаний». Таким образом, в настоящее время нельзя утверждать, что в будущем изменятся климатические условия (в том числе и роза ветров) на Карадаге.

**5. ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ
ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРЫ
РАДИОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ И
ВОЗМОЖНОСТЬ УМЕНЬШЕНИЯ
ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРЫ НА
РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ
НАБЛЮДЕНИЯ В МИЛЛИМЕТРОВОМ
ДИАПАЗОНЕ**

Основным естественным фактором, воздействующим на климат Земли, является Солнце и его активность. Механизм воздействия солнечной активности разнообразен, однако основное воздействие на земную атмосферу и поверхность осуществляется через интегральный поток электромагнитного излучения Солнца и его спектральные составляющие от ультрафиолета до микроволнового излучения. Основным атмосферным объектом, воспринимающим это излучение и взаимодействующим с ним, является водяной пар, который в основном (примерно на 70 %) определяет погодные и климатические характеристики Земли, такие как температура, влажность, облачность, осадки, ветер.

Радиометрические методы зондирования атмосферы позволяют определять интегральное содержание Q водяного пара в столбе по собственному излучению (поглощению) радиоизлучения атмосферы в линиях поглощения водяного пара. Такие исследования проводятся в основном в микроволновой линии поглощения водяного пара $\nu = 22.23$ ГГц ($\lambda = 1.35$ см). Однако спектральная линия H_2O $\lambda = 1.35$ см является достаточно слабой для измерения малых содержаний Q водяного пара в атмосфере. В этом случае предпочтительно использовать сильную линию поглощения H_2O $\nu = 183$ ГГц ($\lambda = 1.64$ мм), а точнее, ее длинноволновый склон в диапазоне 140–150 ГГц, где поглощение в атмосфере составляет величины $\tau \sim 1$. В силу указанных обстоятельств чувствительность к изменению содержания Q водяного пара в линии 1.64 мм, например, на частоте 140 ГГц примерно в 3.5 раза больше, чем в традиционном диапазоне исследования H_2O в линии 1.35 см.

По определению, интегральное содержание водяного пара есть

$$Q = \int_0^{\infty} \rho_{\text{H}_2\text{O}}(h) dh, \quad (9)$$

где $\rho_{\text{H}_2\text{O}}(h)$ — вертикальный профиль абсолютной влажности. Согласно работе [17], коэффициент поглощения $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}(h)$ водяного пара пропорционален абсолютной влажности:

$$\alpha_{\text{H}_2\text{O}}(h) = \varphi_{\text{H}_2\text{O}}(h) \rho_{\text{H}_2\text{O}}(h), \quad (10)$$

где $\varphi_{\text{H}_2\text{O}}(h)$ — удельный коэффициент поглощения водяного пара. Интегрируя выражение (10) и применяя теорему о среднем, имеем

$$\begin{aligned} \tau_{\text{H}_2\text{O}} &= \int_0^{\infty} \alpha_{\text{H}_2\text{O}}(h) dh = \int_0^{\infty} \varphi_{\text{H}_2\text{O}}(h) \rho_{\text{H}_2\text{O}}(h) dh \simeq \\ &\simeq \bar{\varphi}_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) Q, \quad (11) \end{aligned}$$

где $\bar{\varphi}_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ — эффективное значение удельного коэффициента поглощения водяного пара.

На практике для обращения задачи используется регрессионное соотношение, связывающее полное поглощение с интегральным содержанием Q водяного пара:

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) = \tau_{\text{O}_2}(\lambda) + \bar{\varphi}_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) Q. \quad (12)$$

Здесь поглощение в кислороде, $\tau_{\text{O}_2}(\lambda)$, и эффективные значения удельного коэффициента поглощения в водяном паре, $\bar{\varphi}_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$, рассчитываются заранее по квантовомеханической теории поглощения в кислороде [16] и в водяном паре [17].

Для рабочей частоты радиометра $\nu = 140$ ГГц получаем $\tau_{\text{O}_2}(\lambda) = 0.029$ и $\bar{\varphi}_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \approx 0.2458$ см²/г; значения Q измеряются в единицах г/см², принятых в метеорологии.

Естественно, что соотношение (12) выполняется только для ясной атмосферы. В этом случае для определения вертикального поглощения $\tau(\lambda)$ полностью применим метод атмосферных разрезов, изложенный выше.

Выше на рис. 2 представлены значения интегрального содержания Q водяного пара, измеренные радиометрическим методом по поглощению на частоте $\nu = 140$ ГГц, по изложенной выше методике. Анализ полного цикла измерений Q в июле–сентябре 2017 г. показал, что среднее значение содержания Q водяного пара составило $Q_{mean} = 1.3$ г/см², а максимальные и минимальные значения — $Q_{max} = 1.6$ г/см² и $Q_{min} = 0.4$ г/см². Средние значения Q примерно в два раза меньше аналогичных значений для средневропейской части РФ. Этот факт действительно указывает на уникальность Кара-Дага и, по всей видимости, всего Крыма с учетом того обстоятельства, что эти районы находятся в прибрежной зоне, где содержание Q водяного пара обычно составляет $Q = 3$ г/см² и более (например, Кавказское побережье).

На рис. 6 представлены значения атмосферного поглощения и интегрального содержания Q водяного пара, измеренные радиометрическим методом по

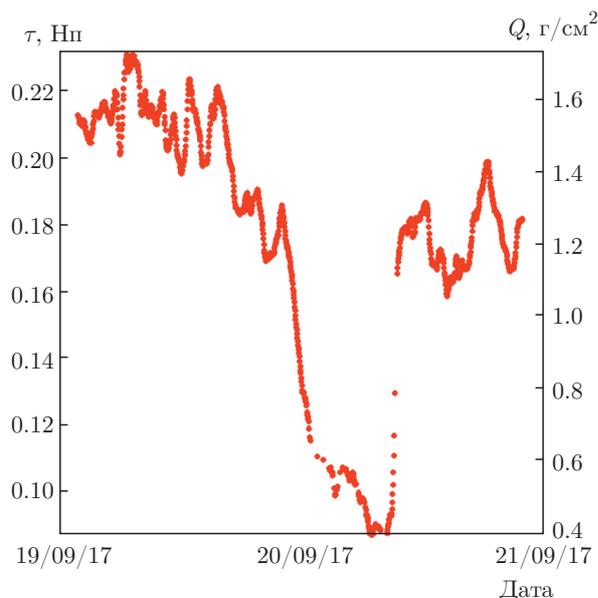


Рис. 6. Значения атмосферного поглощения τ и интегрального содержания Q водяного пара, измеренные радиометрическим методом по поглощению на длине волны 3 мм за период, показанный на рис. 4. $Q = 1 \text{ г/см}^2$ соответствует 10 мм осажденной влаги. В ситуации, показанной на рис. 4, Q падает до 3–4 мм осажденной влаги, что является хорошим показателем, соответствующим лучшим значениям для высокогорных телескопов

поглощению на длине волны 3 мм за период, показанный на рис. 4. Значения Q даны в единицах г/см^2 , принятых в метеорологии; 1 г/см^2 соответствует 10 мм осажденной влаги. Видно, что в ситуации, показанной на рис. 4, значение Q падает до 3–4 мм осажденной влаги, что является хорошим показателем, соответствующим средним зимним значениям для высокогорного телескопа IRAM-30m (расположенного на высоте 2850 м) [20].

Отметим, что по измеренным значениям Q с помощью соотношения (12) можно определять атмосферные поглощения для всего микроволнового диапазона волн, исключая линию поглощения молекулярного кислорода O_2 . По измеренным значениям Q помимо атмосферного поглощения на частотах работы радиотелескопов могут быть также в реальном масштабе времени получены тропосферные задержки радиосигналов и вклад атмосферы в антенную температуру радиотелескопов.

Необходимо отметить, что использование модельных представлений для Q имеет низкую точность из-за большой изменчивости интегрального влагосодержания. Сравнение измерений тропосферной задержки даже с лучшими моделями [18] по-

казало, что точность радиометрических измерений примерно в 20 раз лучше модельных прогнозов.

Измерение вклада излучения атмосферы в принимаемый радиотелескопом сигнал может также проводиться штатным радиометрическим приемником непосредственно в процессе радиоастрономических измерений на рабочих частотах радиотелескопа [20]. Такие измерения имеют более низкую точность по сравнению со специализированными системами дистанционного зондирования, так как рабочие частоты радиотелескопа не оптимизированы под задачу дистанционного зондирования атмосферы. Рассмотрим точности измерения интегрального влагосодержания системами дистанционного зондирования атмосферы.

Как уже отмечалось, в настоящее время основная тенденция развития инструментов миллиметровой радиоастрономии заключается в подъеме антенн радиотелескопов в горы на значительную высоту или в места с холодным климатом. Делается это для того, чтобы уменьшить интегральное влагосодержание в атмосфере над антенной [20]. Величина интегрального влагосодержания 2–4 мм осажденной влаги ($0.2\text{--}0.4 \text{ г/см}^2$) считается очень хорошим условием для проведения радиоастрономических измерений [20]. Опыт измерений атмосферного поглощения в микроволновой линии поглощения водяного пара $\lambda = 1.35 \text{ см}$ [18] показал, что средняя разность значений влагосодержания, определенного на основе радиометрических и радиозондовых данных, не превосходила 0.05 г/см^2 (0.5 мм осажденной влаги) для летних условий средней полосы России (г. Долгопрудный Московской области). Использование излучения атмосферы на склоне сильной линии поглощения водяного пара $\lambda = 1.64 \text{ мм}$ в диапазоне 140–150 ГГц позволяет повысить чувствительность в 2–3 раза и создать радиометрическую систему для измерения малых значений интегрального влагосодержания с аналогичной точностью.

В настоящее время специализированные системы дистанционного зондирования влагосодержания атмосферы применяются для введения поправок на фазовые задержки в атмосфере для систем апертурного синтеза и РСДБ-систем в высокогорных обсерваториях [21, 22]. Из-за малого влагосодержания используется не только излучение на крыльях линии 183 ГГц, но и в максимуме этой линии, ведутся работы по освоению еще более высокочастотных и сильных линий поглощения водяного пара. В то же время совершенствованию методов калибровки, как нам представляется, уделяется недостаточно внимания. Калибровка осуществляется при разных темпе-

ратурах «чернотельными» дисками, которые закрывают апертуру рупора в фокусе антенны. Очевидно, что сама антенна при этом не калибруется. Полная калибровка возможна по радиоизлучению космических радиоисточников, потоки которых хорошо известны. Измерение потоков этих калибровочных источников является отдельной задачей, так как для ее решения нужны методы калибровки не связанные с излучением космических объектов.

Напомним, что РАС «Кара-Даг» создавалась для измерения абсолютных потоков и спектров космических радиоисточников методом «искусственной Луны» [7]. Внешний калибратор — «чернотельный» диск (искусственная Луна) — располагался на горе в дальней зоне антенны. В качестве первичных эталонов использовались наиболее мощные космические радиоисточники. Их излучение сравнивалось с излучением «чернотельного» диска. При этом измерения проводились антеннами небольших размеров (7–12 м), чтобы удовлетворить условию нахождения «чернотельного» диска в дальней зоне антенны. Более слабые источники — вторичные эталоны — измерялись относительно первичных эталонов на антеннах больших размеров.

На волнах миллиметрового диапазона использовать метод «искусственной Луны» невозможно, так как расстояние до дальней зоны антенны слишком велико. Единственным источником сигнала для внешней калибровки в данном случае является излучение атмосферы. Это излучение должно удовлетворять двум условиям: его интенсивность должна быть точно измерена и излучение атмосферы должно быть достаточно велико, чтобы создать калибровочную ступеньку нужной величины. Калибровочной ступенькой может быть, например, разность излучений в зените и под углом 70° от зенита, где хорошо работает плоско-слоистая модель атмосферы при ясной погоде. Это условие вступает в противоречие с условием слабого поглощения в атмосфере при измерениях космических радиоисточников. Для проведения измерений космических радиоисточников с атмосферной калибровкой нужно место, где в течение небольшого промежутка времени, пока остаются стабильными параметры приемной аппаратуры (часы, сутки), могут наблюдаться ситуации как достаточно сильного излучения атмосферы (для калибровки), так и слабого (для измерения космических радиоисточников) как первичных эталонов миллиметрового диапазона длин волн. Эта же процедура позволит уточнить калибровки для метода черных тел, закрывающих рупоры в фокусе антенн, который используется в настоящее время.

Достаточно высокое угловое разрешение антенны диаметром 12–15 м в субмиллиметровом диапазоне и наличие абсолютной калибровки по излучению атмосферы позволяют исследовать, например, распределение абсолютной величины яркостной температуры и диэлектрической проницаемости грунта по диску Луны (угловой размер Луны около $30'$), в том числе в линиях поглощения газов, выделяющихся из лунных пород. Такие газовые выбросы могут быть индикатором наличия воды в лунных породах, что существенно для выбора мест будущих лунных станций.

Радиоизлучение планет является удобным калибровочным сигналом в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Абсолютные измерения потоков и спектров излучений Юпитера и Венеры проводились ранее на длине волны 8 мм на РАС «Кара-Даг» [7]. Продолжение и развитие этих исследований в коротковолновой части миллиметрового диапазона и на субмиллиметровых волнах важно для использования радиоизлучения планет как калибровочных эталонов и исследований характеристик планетных атмосфер.

Несмотря на смещение акцента в радиоастрономии на использование крупных телескопов, средние и небольшие, по современным понятиям, телескопы не потеряли своего значения [1] (см. также редакторскую статью [23]). Радиотелескоп даже с небольшим размером антенны (12–15 м), установленный на РАС «Кара-Даг», позволит проводить исследования по целому ряду актуальных задач радиоастрономии, космологии, физики космоса:

- крупномасштабная структура и кинематика комплексов звездообразования;
- мониторинг переменных радиоисточников в континууме и в спектральных линиях;
- измерения профилей спектральных линий с высоким отношением сигнал/шум;
- поиск вариаций фундаментальных констант;
- транзиенты (быстрые радиовсплески, послесвечение гамма-всплесков, источники гравитационных волн);
- РСДБ (возможно, участие в глобальной сети «Телескоп горизонта событий», в будущем — участие в программе «Миллиметрон»);
- Солнце (субтерагерцовое излучение вспышек);
- микроволновый («реликтовый») фон — спектрально-пространственные флуктуации.

Как видно из изложенного выше, Кара-Даг является возможным местом для проведения таких абсолютных измерений, когда наблюдаются ситуации как относительно сильного излучения атмосферы

ры, так и резкого падения атмосферного поглощения на достаточно коротких интервалах времени. Для этого РАС «Кара-Даг» должна быть оборудована антенной миллиметрового диапазона размером 12–15 м, чувствительными радиоастрономическими приемниками и специализированной радиометрической системой атмосферной диагностики, описанной выше, имеющей высокую точность измерения параметров атмосферы как при средних, так и при малых влагосодержаниях. Необходимо отметить, что предлагаемая система абсолютных измерений не может быть реализована в высокогорных обсерваториях из-за малого излучения атмосферы. Однако измеренные таким способом первичные эталоны могут быть использованы для внешней калибровки высокогорных радиотелескопов.

Радиоастрономические наблюдения проводятся не только в ночное, но и в дневное время. Например, задачи РСДБ-наблюдений решаются совместной работой радиотелескопов, участвующих в сети на большом расстоянии в разных часовых поясах. Специализированная радиометрическая система атмосферной диагностики позволит измерять тропосферную задержку сигнала как при средних, так и при малых влагосодержаниях, и не только в ночное, но и в дневное время. При достаточной точности измерений тропосферной задержки сигнала это позволит обеспечить работу антенны миллиметрового диапазона на РАС «Кара-Даг» в рамках РСДБ-наблюдений в любое время суток. Для обеспечения дневных наблюдений радиоастрономическая антенна должна работать и при неоднородном солнечном нагреве. Пока вопрос о пригодности РАС «Кара-Даг» для РСДБ-задач остается открытым и требует отдельного изучения.

В дальнейшем планируется продолжение длительных исследований астроклимата на Карадаге, в том числе и в зимнее время.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследования астроклимата на радиоастрономической станции «Кара-Даг» (Республика Крым) в 2017 г. Проведен анализ алгоритмов обработки данных, полученных методом атмосферных разрезов. Рассмотрены закономерности изменения параметров прозрачности атмосферы и их связь с климатическими особенностями места наблюдений. Показано, что из-за специфической розы ветров, обеспечивающей высокую прозрачность воздуха, даже в

летнее время на РАС «Кара-Даг» атмосферное поглощение падает до уровней, соответствующих лучшим значениям для высокогорных телескопов. Предложено создание измерительного комплекса, позволяющего проводить более точные калибровки радиотелескопов миллиметрового диапазона длин волн. Представляется, что полученные результаты, даже при их ограниченном объеме, стимулируют систематические измерения атмосферного поглощения на Карадаге.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проекты государственного задания Нижегородского государственного университета (№ 3.8070.2017/8.9)), Нижегородского государственного технического университета (№ 16.2562.2017/ПЧ), Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики Российской академии наук» (№№ 0035-2014-0021, 0035-2014-0206), Института морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского Российской академии наук (№ 0556-2019-0006) и Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского — природного заповедника Российской академии наук (АААА-А19-119012490044-3).

ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Конникова, Е. Е. Лехт, Н. А. Силантьев, *Практическая радиоастрономия*, Изд-во МГУ, Москва (2011).
2. Н. С. Кардашев, И. Д. Новиков, В. Н. Лукаш и др., *УФН* **184**, 1319 (2014).
3. <http://astrosovet.ru/radiotel.html>.
4. А. В. Смирнов, А. М. Барышев, П. ДеБернардис и др., *Изв. вузов, Радиофизика* **54**, 617 (2011).
5. В. Е. Зуев, Ю. С. Макушкин, Ю. Н. Пономарев, *Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 3. Спектроскопия атмосферы*, Гидрометеопиздат, Ленинград (1987).
6. В. Е. Панчук, В. Л. Афанасьев, *Астрофиз. бюлл.* **66**, 253 (2011).
7. *Первый в стране Радиофизический институт (от создания до наших дней)*, под ред. С. Д. Снегирева, В. М. Фридмана, О. А. Шейнер, ФГБНУ НИРФИ, Нижний Новгород (2016).

8. М. М. Бескаравайный, Н. С. Костенко, Л. П. Миронова и др., *Природа Карадага*, под ред. А. Л. Морозовой, А. А. Вронского, Наук. думка, Киев (1989); <http://karadag.com.ru/complex/climate>.
9. M. I. Agafonov, G. M. Bubnov, I. T. Bubukin et al., *Astrophys. Bull.* **73**, 387 (2018), DOI: 10.1134/S1990341318030124.
10. В. И. Носов, О. С. Большаков, Г. М. Бубнов и др., ПТЭ Вып. 3, 49 (2016).
11. И. Т. Бубукин, К. С. Станкевич, Успехи современной радиоэлектр. Вып. 11, 39 (2006).
12. А. Г. Кисляков, К. С. Станкевич, Изв. вузов, Радиофизика **10**, 1244 (1967).
13. А. Г. Кисляков, Радиотехн. и электрон. **13**, 1161 (1968).
14. *Математическая статистика*, Высшая школа, Москва (1981).
15. С. А. Жевакин, А. П. Наумов, Изв. вузов, Радиофизика **10**, 1213 (1967).
16. P. W. Rasenkrans, *J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transf.* **39**, 287 (1988).
17. В. Ю. Катков, Радиотехн. и электрон. **42**, 1441 (1997).
18. Г. Н. Ильин, А. В. Троицкий, Изв. вузов, Радиофизика **60**, 326 (2017).
19. Г. С. Курбасова, А. Е. Вольвач, в сб. *Наука вчера, сегодня, завтра*, Изд-во Ассоциация научн. со-трудн. «Сибирская академическая книга», Новосибирск вып. 4(26), 79 (2016).
20. <http://www.iram-institute.org/>.
21. M. C. Wiedner, R. E. Hills, J. E. Carlstrom, and O. P. Lay, *Astrophys. J.* **553**, 1036 (2001).
22. B. Nikolic, R. C. Bolton, S. F. Graves et al., *Astron. and Astrophys.* **552**, A104 (2013).
23. Editorial in *Nature Astronomy* **2**, 345 (2018).