

УДК 537.876+551.51

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН НА РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ РОССИИ И УЗБЕКИСТАНА

© 2021 г. И. Т. Бубукин<sup>1,\*</sup>, И. В. Ракуть<sup>1,2</sup>, М. И. Агафонов<sup>1,2</sup>, А. А. Яблоков<sup>2,3</sup>,  
А. Л. Панкратов<sup>1,2,3</sup>, Т. Ю. Горбунова<sup>4</sup>, Р. В. Горбунов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский радиопизический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup> Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>4</sup> ФИЦ Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Россия

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

Поступила в редакцию 16.02.2021 г.

После доработки 30.03.2021 г.

Принята к публикации 30.04.2021 г.

На основе сравнительного анализа данных интегрального влагосодержания атмосферы в период 08.2019–01.2020 для полигона ННГУ НИРФИ Карадаг, трех полигонов ИПА РАН (Зеленчукская, Светлое, Бадары) и строительной площадки 70-м радиотелескопа на плато Суффа (Узбекистан) (средние значения за 1981–1991 гг.) показана целесообразность расширения параметров оценки при выборе площадки Карадаг для установки антенн миллиметрового диапазона. Это связано с отсутствием на территории Российской Федерации мест с устойчиво хорошей прозрачностью атмосферы в миллиметровом диапазоне, сравнимых с плато Чахнантор в Чили. Наряду с использованием среднемесячных значений интегрального влагосодержания в качестве основного критерия к выбору площадки следует учитывать как характеристику розы ветров на полигоне Карадаг, так и более детальное ежесуточное и внутрисуточное распределение влагосодержания. На площадке Карадаг даже в летнее время периодически возникает высокая прозрачность атмосферы. Интегральное влагосодержание уменьшается до уровней, сопоставимых с этим параметром на горной площадке Суффа. Полученные результаты позволяют скорректировать существующие принципы размещения астрономических инструментов и систем космической связи миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов на территории РФ.

*Ключевые слова:* миллиметровые волны, распространение, атмосфера, поглощение, влагосодержание

DOI: 10.31857/S0004629921080016

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Существенное развитие в последнее время технологий приема и усиления слабых сигналов в миллиметровом диапазоне длин волн позволяет ставить задачу создания систем связи, радиоастрономических систем, а также многоканальных систем дистанционного зондирования миллиметрового диапазона с целью как экологического мониторинга, так и учета поглощения атмосферы в прикладных задачах.

К преимуществам применения миллиметровых волн (ММВ) в системах связи следует отнести, прежде всего, такие факторы, как увеличение объема и скорости передачи информации, высокое усиление антенн при их малой апертуре, а также повышенную помехозащищенность каналов связи. В системах космической связи узкие диаграммы направленности антенн на ММВ спо-

собствуют повышению скрытности связи и подавлению интерференционных помех, а большой коэффициент усиления позволяет уменьшать мощность передатчика и улучшать массогабаритные характеристики аппаратуры спутника. Применение узконаправленных многолучевых бортовых антенн позволяет осуществлять коммутацию линий спутниковой связи.

Наиболее приоритетные спутниковые линии связи, работающие на частотах свыше 20 ГГц, уже находятся сегодня в эксплуатации [1]:

- Спутник L-SAT/OLYMPUS (Западная Европа) имеет общую ширину полос рабочих частот в диапазонах 14/11 и 30/20 ГГц около 6.8 ГГц. Полоса пропускания ствола составляет 240 МГц, что обеспечивает передачу информации со скоростью 360 Мбит/с.

- Спутник MILSTART (США) с широкополосным ретранслятором работает в диапазоне частот 44/20 ГГц. На борту ИСЗ предусмотрено использование шумоподобных сигналов и псевдослучайная перестройка частот в полосе 2 ГГц, а также коммутация сигналов.

- Спутники ECS-2 и ACTS-E (Япония) функционируют в диапазонах частот 30/20 и 50/40 ГГц при полосе пропускания стволов 250 МГц со скоростью передачи данных не ниже 400 Мбит/с.

В конце 1990-х годов, после того как Федеральная комиссия по связи США (FCC) опубликовала доклад с подробным описанием возможностей систем, работающих на частотах ММВ, полосы частот E-диапазона активно осваиваются для построения систем связи со сверхбольшой пропускной способностью (до 10 Гбит/с).

Основным фактором, определяющим возможности использования ММВ для радиосвязи (наземной, спутниковой, а также для связи с летательными аппаратами), является эффект затухания радиоизлучения в этом диапазоне в атмосферных газах и гидрометеорах.

Идеальным критерием для выбора места радионаблюдательной обсерватории или пункта космической связи, работающих в диапазоне ММВ, должно быть устойчиво хорошая и хорошо предсказуемая прозрачность атмосферы в диапазоне ММВ. К сожалению, условия, близкие к плато Чахнантор в Чили, встречаются редко. На территории СССР, по-видимому, только Горно-Бадахшанская автономная область в Таджикистане (плато Шорбулак [2, 3]) и в меньшей степени плато Суффа в Узбекистане могут быть аналогами по атмосферному поглощению. К сожалению, после 1991 г. они оказались за пределами Российской Федерации (РФ). Антенны миллиметрового диапазона являются дорогостоящими инструментами, а их нахождение за пределами РФ еще более удорожает их строительство, эксплуатацию и существенно ухудшает транспортную доступность. Необходимо отметить, что вложение значительных средств за пределами РФ имеет существенные политические риски. Причем это относится не только к республикам Средней Азии, но также и к участию РФ в Южной Европейской обсерватории (ESO), что связано не только с высокой стоимостью оплаты членства в ESO, но и с санкциями. К сожалению, авторам неизвестны на территории РФ площадки с устойчиво хорошей и хорошо предсказуемой прозрачностью атмосферы, поэтому в статье рассматриваются места, возможно, и не соответствующие идеальным критериям, но где периодически возникающая прозрачность атмосферы делает возможным регулярные измерения в миллиметровом диапазоне, хотя и не со 100% по времени.

Для реализации в Российской Федерации спутниковых систем связи в диапазоне ММВ необходимо создание наземной инфраструктуры, обеспечивающей прием и передачу спутниковой информации в диапазоне ММВ. Для Евпаторийского пункта космической связи, расположенного на западе Крыма, сравнение влагосодержания в приземной атмосфере на основе имеющихся географических и метеоданных (см. ниже) показывает, что там условия хуже, чем для Карадага. Однако, поскольку сравнение проводилось по приземным условиям, то требуются дальнейшие исследования интегрального влагосодержания во всей толще атмосферы, которое определяет поглощение ММВ. Другие существующие на территории РФ пункты космической связи не могут быть использованы в диапазоне ММВ из-за значительного атмосферного поглощения.

Полигон Карадаг создавался в 60-е годы XX века как научная станция для абсолютных измерений потоков космических радиоисточников в широком диапазоне длин волн от метров до 8 мм. С учетом основной тенденции развития систем связи и радиоастрономии в освоении миллиметровых и более коротких длин волн в последние годы в НИРФИ ННГУ проведены измерения атмосферного поглощения в окнах прозрачности ММВ. В результате в [4] была показана возможность использования этого пункта для измерений космических источников в диапазоне ММВ. Существующие атмосферные особенности (наложение местного ветра бора, горно-долинная и бризовая циркуляция), а также расположение горного массива Карадаг в циркуляционной тени от Главной гряды Крымских гор, в результате чего этот район является одним из самых засушливых на территории РФ, создают на полигоне Карадаг благоприятные условия для ночных наблюдений в миллиметровом диапазоне длин волн.

Целью данной работы является сравнительный анализ условий распространения ММВ на полигоне Карадаг и на трех полигонах Института прикладной астрономии РАН (ИПА РАН), находящихся в разных климатических зонах РФ. В работе используются результаты измерений авторами атмосферного поглощения на полигоне Карадаг в полосе 93–96 ГГц (соответствующая длина волны 3 мм) в августе-январе 2019–2020 гг. и имеющиеся в свободном доступе<sup>1</sup> результаты измерений тропосферной задержки сигнала за тот же промежуток времени в системе точного позиционирования ГЛОНАСС для полигонов ИПА РАН: Светлое (Ленинградская область), Зеленчукская (Карачаево-Черкесская Республика) и Бадары (Республика Бурятия). Аналогичные работы проводились для выбора места размещения радиоте-

<sup>1</sup> Для получения данных требуется бесплатная регистрация на сайте [5].

лескопа миллиметрового диапазона с 70-м основным рефлектором РТ-70 проекта П-2500 в 1981–1991 гг. в СССР. По результатам исследований такой инструмент было решено разместить в обсерватории на плато Суффа (высота 2335 м над уровнем моря), в настоящее время находящейся за пределами РФ (Республика Узбекистан) [6]. Размещение инструментов коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн высоко в горах и использование мест с холодным климатом является наиболее распространенным подходом в настоящее время, к нему можно отнести и выбор плато Суффа.

В этой связи за методологическую основу сравнения на первом этапе был взят подход, использованный при выборе плато Суффа. В разделе 2 рассмотрены погодные условия для всех пяти полигонов. В разделе 3 представлены полученные результаты измерений атмосферного поглощения в окне прозрачности атмосферы 3 мм и интегральные влагосодержания атмосферы за период 08.2019–01.2020 гг. на полигоне Карадаг. Результаты измерений интегрального влагосодержания атмосферы на полигоне ИПА РАН приведены в разделе 4. Они получены с использованием тропосферной задержки сигнала в системах точного позиционирования. Как будет показано далее, последовательное применение подхода, использованного для выбора плато Суффа, приводит к размещению инструментов в местах с холодным климатом (радиотелескоп миллиметрового диапазона был размещен даже на Южном полюсе), что существенно удорожает строительство и эксплуатацию установок. Если для целей радиоастрономии, при наличии достаточного финансирования, такой подход можно реализовать на практике, то для систем связи это неприемлемо, так как они должны быть размещены ближе к потребителю и быть в транспортной доступности на территории РФ. Поэтому в разделе 5 статьи мы представляем альтернативный подход к размещению пунктов космической связи и радиотелескопов ММВ на территории РФ.

## 2. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ ПО МЕТЕОДАНЫМ ДЛЯ ПОЛИГОНА КАРАДАГ, ПЛАТО СУФФА И ТРЕХ ПОЛИГОНОВ ИПА РАН

Основными факторами, влияющими на распространение ММВ в атмосфере, являются поглощение в атмосферных газах – кислороде и водяном паре, а также капельной фракции облаков. Поэтому, как правило, минимальное атмосферное поглощение ММВ наблюдается в ясную безоблачную погоду. Рассмотрим в этом разделе два важных параметра для полигонов: Параметр 1 – количество ясных дней и ночей, Параметр 2 – приземная температура, от которой зависят фазо-

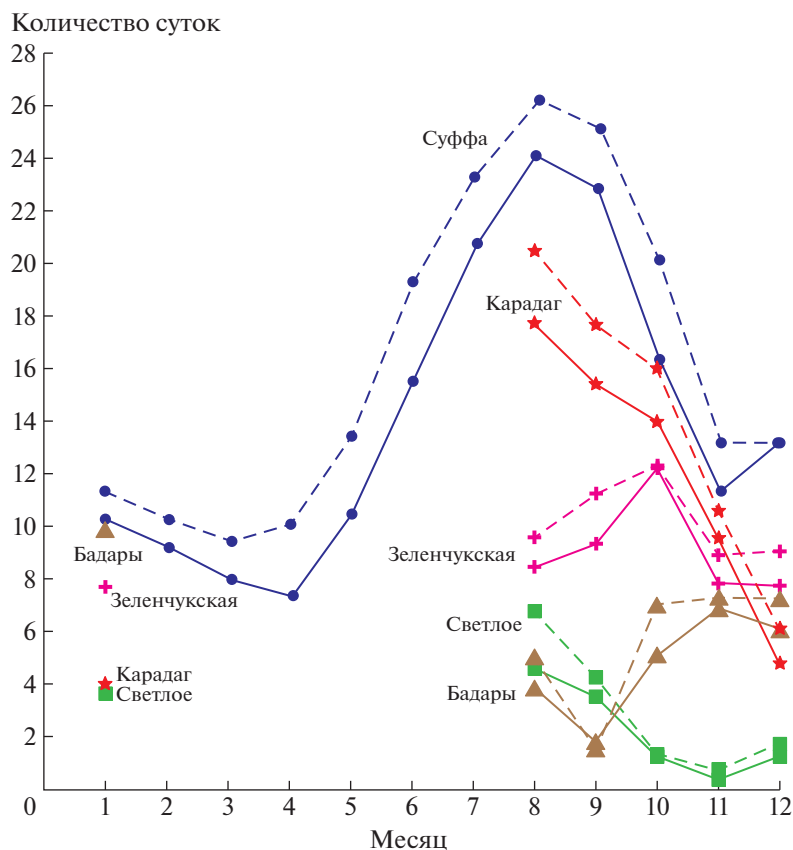
вые состояния атмосферной влаги. Параметр 3 – интегральная влажность атмосферы, будет подробно рассмотрен ниже в разделах 3 и 4.

### 2.1. Параметр 1. Ясные сутки и ясные ночи

Количество ясных дней в году было одним из основных факторов при выборе плато Суффа [6]. Погодные условия считались благоприятными для радиоастрономических измерений в миллиметровом диапазоне при облачности менее 2.5 балла (т.е. процент покрытия неба облаками менее 25%). Автоматические метеостанции на полигонах Карадаг и ИПА РАН не регистрируют состояние облачности, поэтому были использованы данные ближайших метеостанций Росгидромета, имеющие архивы погоды на своем сайте<sup>2</sup>. Для полигона Карадаг – это метеостанция в п. Курортное (№ 33957), расположенная на расстоянии 3 км от полигона. Для полигона Светлое – метеостанция в д. Сосново (№ 22891) на расстоянии 25 км от плато, для полигона Зеленчукская – метеостанция в ст. Зеленчукская (№ 37112), на расстоянии 5 км, и для полигона Бадары – метеостанция в п. Кырен (№ 30806), на расстоянии 10 км. На рис. 1 приведены средние данные о промежутках времени в сутках, когда это условие выполняется. Они показаны сплошными линиями, соединяющими соответствующие значения каждого месяца, в том числе для Суффы по месяцам [6] (ясные сутки) в 1981–1991 гг. – значения нанесены синими точками, для других рассматриваемых полигонов по месяцам с августа 2019 г. по январь 2020 г. данные показаны красными звездочками (Карадаг), зелеными квадратиками (Светлое), лиловыми крестиками (Зеленчукская), и коричневыми треугольниками (Бадары).

Данные для полигонов приведены для тех интервалов времени, когда имеются измерения атмосферного поглощения для Карадага и тропосферной задержки сигнала для полигонов ИПА. Для Карадага измерения охватывают от 75% до 100% времени в разные месяцы, для полигонов ИПА измерения тропосферной задержки сигнала охватывают в разные месяцы от 50% до 70% времени. Это сделано для того, чтобы было видно, какой доле времени и метеоусловиям соответствуют приводимые далее данные о характеристиках распространения ММВ в разных местах. Из рис. 1 видно, что в летне-осенний период доля ясной погоды для Карадага существенно превышает этот параметр для полигонов ИПА РАН и сравнима с данными для Суффы. Необходимо отметить, что полученное для Карадага меньшее значение доли ясной погоды по сравнению с Суффой может быть характерно только для сезона 2019 г., в то время, как для Суффы использова-

<sup>2</sup> [gr5.ru](http://gr5.ru)



**Рис. 1.** Средние данные о промежутках времени в сутках при облачности менее 2.5 балла представлены сплошными линиями по месяцам за 1981–1991 гг. для плато Суффа (синие точки), а также для других полигонов по месяцам с августа 2019 г. по январь 2020 г. для интервалов времени, когда проводились измерения условий распространения ММВ: Карадаг (красные звездочки), Светлое (зеленые квадратики), Зеленчукская (лиловые крестики), Бадары (коричневые треугольники). Кроме того, штриховыми линиями показаны также средние данные о промежутках времени в ночах, когда наблюдалась облачность менее 2.5 балла за 1981–1991 гг. для плато Суффа [6] – синие точки (ясные ночи), для других полигонов (с 20 ч вечера до 8 ч утра) с августа 2019 г. по январь 2020 г.: Карадаг – красные звездочки, Светлое – зеленые квадратики, Зеленчукская – лиловые крестики, Бадары – коричневые треугольники.

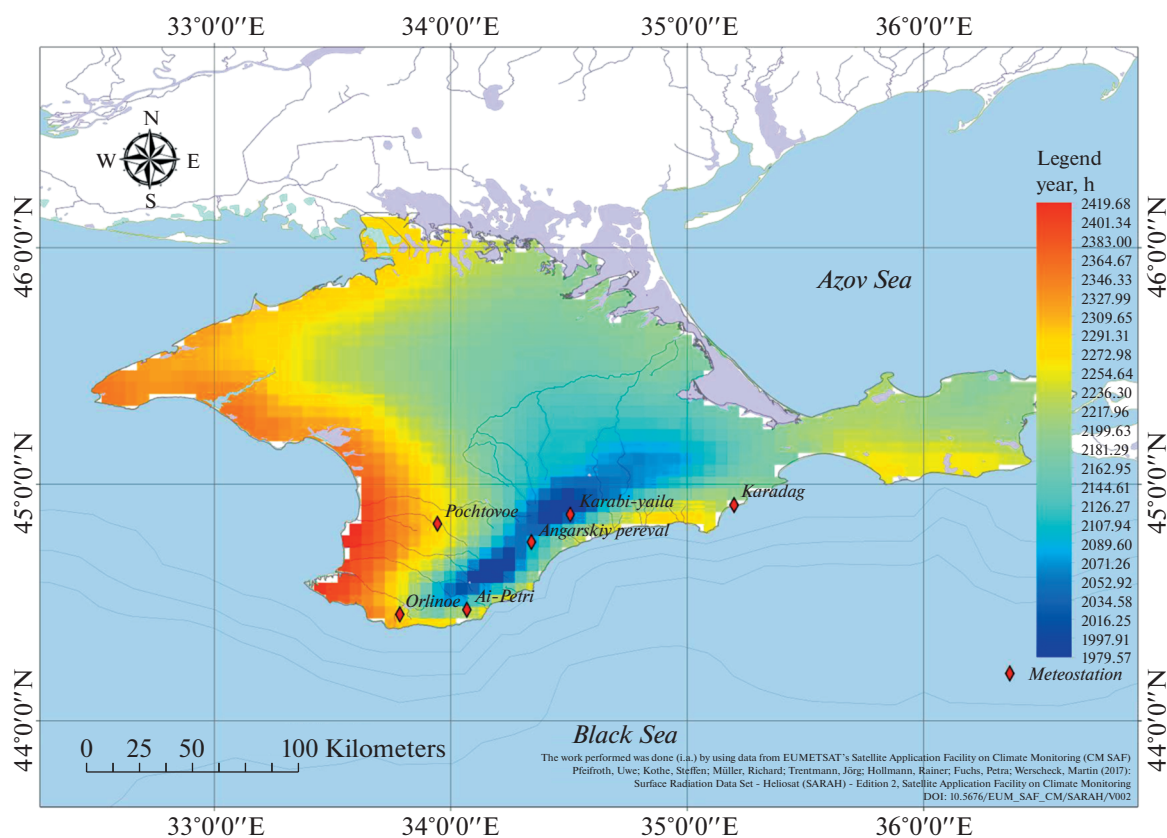
ны данные, усредненные за 10 лет. Очевидно, что измерения тропосферной задержки для полигонов ИПА РАН, старались проводить при ясной погоде, поэтому не охваченное измерениями время не приведет к существенному увеличению количества ясных дней и не изменит качественно картину. В зимний период доля ясной погоды на Карадаге уменьшается и сравнима с полигонами ИПА РАН.

Помимо количества ясных дней в году для плато Суффа в [6] также приведено количество ясных ночей, так как в радиоастрономии ночное время является предпочтительным при приеме слабых сигналов. На рис. 1 приведены также средние данные о промежутках времени в ночах, когда облачность составляет менее 2.5 балла. Они показаны штриховыми линиями, соединяющими соответствующие значения каждого месяца, в том числе для Суффы за 1981–1991 гг. [6] (ясные но-

чи) значения нанесены синими точками, для других полигонов для ночного времени с 20 ч вечера до 8 ч утра с августа 2019 г. по январь 2020 г.: красными звездочками (Карадаг), зелеными квадратами (Светлое), лиловыми крестиками (Зеленчукская) и коричневыми треугольниками (Бадары). Для Суффы и Карадага количество ясных ночей на 10–15% больше количества ясных суток. Для полигонов ИПА разница не столь явно выражена. В [6] не приведена статистика по условиям распространения ММВ в ясные ночи для Суффы, поэтому в дальнейшем будут рассматриваться условия распространения ММВ только для ясных суток.

## 2.2. О метеоусловиях на полигоне Карадаг

Поиск наиболее подходящего места для установки оптического телескопа проводился и ранее, в предвоенные годы. В 1930-х годах исследо-



**Рис. 2.** Продолжительность солнечного сияния на территории Крымского полуострова, ч. Карта построена на основе данных реанализа, выполненного по материалам Европейской организации спутниковой метеорологии [8].

валось поглощение атмосферы [7] для создания южной обсерватории на территории СССР. В итоге была выбрана местность недалеко от поселка Старый Крым (12 км севернее полигона Карадаг), но строительство обсерватории не состоялось из-за войны.

Большая доля ясной погоды для полигона Карадаг объясняется тем, что Республика Крым относится к числу наиболее солнечных районов европейской части России. Продолжительность солнечного сияния здесь, в основном, составляет 2250–2300 час/год в центральной части полуострова, в районе северного Присивашья и центре Керченского полуострова (рис. 2). Карта продолжительности часов солнечного сияния построена на основе данных реанализа, выполненного по материалам Европейской организации спутниковой метеорологии, EUMETSAT's Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF [8]). На западном и Керченском побережье этот показатель увеличивается до 2300–2350 час/год. Параллельно северо-западному, западному и юго-западному побережью при продвижении к нему происходит постепенное увеличение продолжительности солнечного сияния с 2300 до 2400 ч и

более. Продолжительность солнечного сияния по данным метеостанций в различных районах Крыма в часах приведена в табл. 1. Снижение длительности сияния на юго-восточном берегу обусловлено главным образом затененностью местности горами в вечернее время, что не оказывает, однако, влияния на проведение измерений в диапазоне ММВ. Внимание следует уделить значениям среднегогодового количества ясных и пасмурных дней. Они приведены в табл. 2 по данным ряда метеостанций Гидрометцентра Крыма за период инструментальных наблюдений.

Как видно из рис. 2, наибольшая продолжительность солнечного сияния наблюдается в районе Евпаторийского пункта космической связи, находящегося в западном Крыму. Меньшая длительность солнечного сияния в районе Карадага (примерно на 8%) связана с гористым характером местности в юго-восточном Крыму, которое приводит к меньшей продолжительности солнечного сияния еще не являясь свидетельством малого содержания влаги в атмосфере. Следует отметить, что, в отличие от Евпаторийского пункта космической связи, полигон Карадаг почти со всех сто-

**Таблица 1.** Продолжительность солнечного сияния по метеостанциям Крыма,  $\Delta t$ 

№ п/п	Метеостанция	$\Delta t$ , ч
1	Ай-Петри	2210.49
2	Ангарский перевал	2083.00
3	Караби-яйла	2032.05
4	Карадаг	2194.43
5	Орлиное	2252.41
6	Почтовое	2276.42

рон закрыт горами, препятствующими приходу влажных воздушных масс с моря. На рис. 3 приведена рельефная карта местности с южного направления, где видно, что море в существенной степени закрыто горами. Равнинный характер местности в районе Евпатории способствует свободному распространению влажного морского воздуха в глубь суши. К сожалению, на данный момент нет данных измерений интегрального влагосодержания атмосферы в западном Крыму. Однако приземные значения абсолютной влажности и характер растительности свидетельствуют о меньшем влагосодержании в районе полигона Карадаг, чем в Евпатории. Территории вокруг площадок Евпаторийского пункта космической связи активно используются для выращивания сельскохозяйственных культур, в то время как в районе полигона Карадаг растет только виноград. Для более качественного сравнения условий распространения ММВ в районе Евпатории необходимы локальные измерения интегрального влагосодержания.

В рамках существующего подхода антенны ММВ стараются устанавливать на вершинах гор. Всего в Горном Крыму насчитывается 16 вершин с высотой более 1500 м. Практически все они находятся на Бабуган-яйле на территории Крымского природного заповедника, в ведомстве Управления делами Президента Российской Фе-

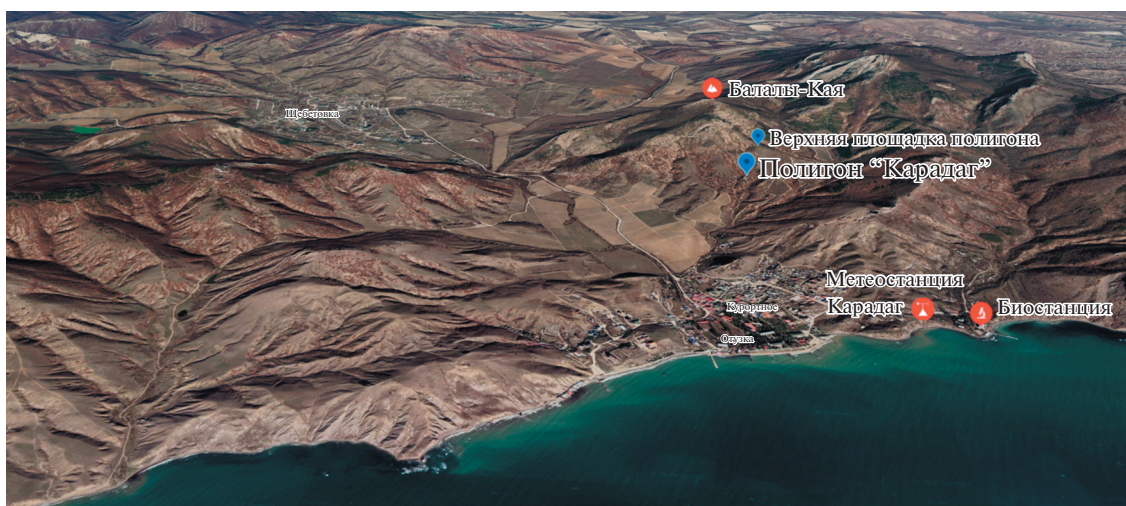
дерации. Согласно ФЗ “Об особо охраняемых природных территориях” от 14.03.1995 № 33-ФЗ ст. 9 (ред. от 28.12.2016) на территории государственного природного заповедника запрещается любая деятельность, противоречащая задачам государственного природного заповедника и режиму особой охраны его территории, установленному в положении о данном государственном природном заповеднике. Это делает невозможным их использование для установки антенн, поэтому далее целесообразно более детально рассмотреть условия на Карадаге.

На метеостанции Карадаг в среднем около 200 малооблачных дней в году, однако на полигоне НИРФИ ННГУ Карадаг, расположенном у подножия горы Балалы-Кая с юго-восточной стороны, солнечных дней должно быть больше, чем на метеостанции Росгидромета, расположенной на морском побережье на расстоянии 3 км от полигона, поскольку обращенный к морю склон Балалы-Кая получает за год наибольшее количество солнечной радиации. Это приводит к нагреву поверхности и возникновению восходящих потоков, препятствующих образованию облаков над данной территорией.

Полигон Карадаг расположен вблизи границы Карадагского природного заповедника, но за его пределами. Климатические условия Карадагского заповедника подробно описаны в [9]. Сочетание особенностей атмосферной циркуляции Карадага, расположенного на границе моря и суши, обуславливает значительные величины солнечной радиации при сравнительно малой облачности. Гористый (и притом чрезвычайно сложно расчлененный) рельеф способствует неравномерному распределению солнечной радиации по склонам. Величина прямой солнечной радиации в сумме за год составляет от 2180 до 3770 МДж/м<sup>2</sup>. На Карадаге преобладают ветры северных румбов, повторяемость которых в течение года превышает 60%. В целом климат заповедника можно определить как переходный от субсредиземноморского, характерного для западной части Юж-

**Таблица 2.** Среднемноголетнее количество ясных и пасмурных дней

Метеостанция	Количество ясных дней			Количество пасмурных дней		
	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.
Ай-Петри	57.6	115	25	81.4	165	2
Ангарский перевал	43.1	70	19	67	135	25
Караби-яйла	57.2	86	25	98.7	134	20
Карадаг	54.5	99	10	124.5	173	73
Орлиное	64.2	98	35	99.5	131	75
Почтовое	60.1	108	17	101.1	143	65



**Рис. 3.** Рельефная карта местности с южного направления на полигон Карадаг. Полигон Карадаг почти со всех сторон закрыт горами, препятствующими приходу влажных воздушных масс с моря (Google Earth, <https://earth.google.com/web/>).

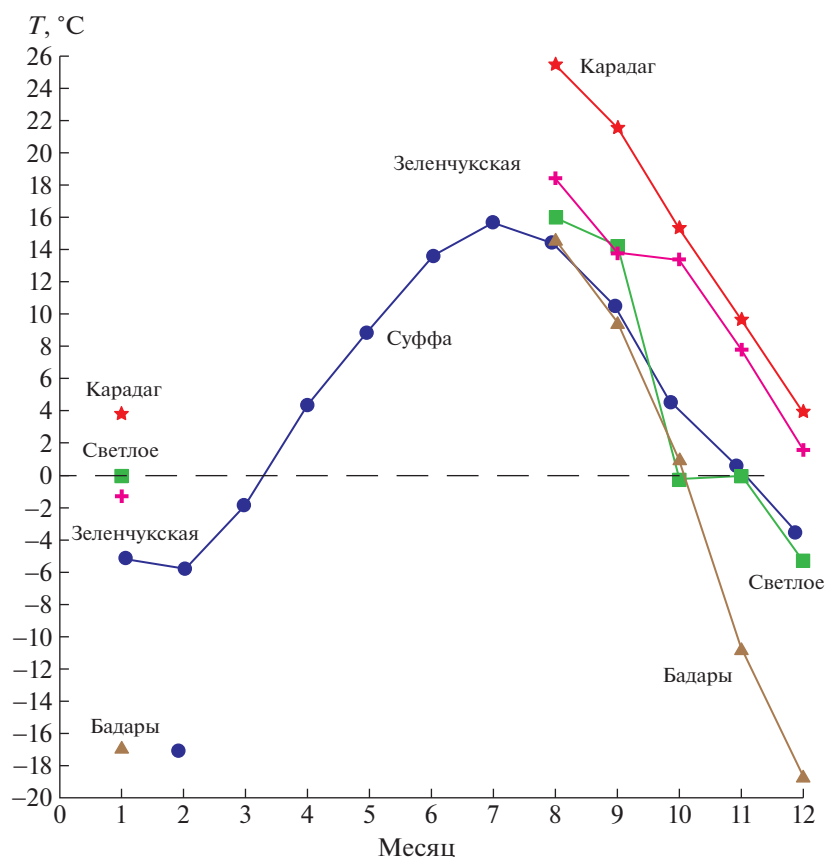
ного берега Крыма (ЮБК), к умеренно континентальному умеренно жаркому сухому, характерному для степной части полуострова.

Осадки в горный Крым во все времена года приходят преимущественно с запада. При этом оказывается, что большую их часть “перехватывает” высокая яйлинская гряда. В результате на юго-восточном побережье Крыма с его невысокими разрозненными вершинами наблюдается выраженный дефицит влаги. Таким образом, заповедник является одним из самых засушливых районов горного Крыма, даже несмотря на то, что в среднем за год здесь бывает около 100 дней с осадками. Это накладывает определенный отпечаток на его растительный покров: здесь отсутствует плющ – обычная даже на ближайшей 7 км горе Эчкидаг лиана, совсем нет бука, плохо произрастает высаженная крымская сосна. Средняя годовая сумма осадков на Карадаге за полувековой период (с 1930 г. по 1980 г.) составила 357 мм (в 1.6 раза меньше, чем в Ялте, и в 1.3 раза меньше, чем в Феодосии). За период с 1920 г. по 2006 г. отмечено возрастание среднегодового количества осадков до 388.5 мм. Среднее количество осадков за 2000–2009 гг. составило 425 мм. Анализ межгодовой динамики количества осадков на Карадаге иллюстрирует их снижение в последнее десятилетие. В работе [10] показано, что количество осадков на Карадаге в период 2012–2018 гг. уменьшилось по сравнению с периодом 2000–2011 гг. на 33.7 мм, что существенно и формирует более засушливые условия среды. Как известно, 2020 год стал очень засушливым в Крыму.

### 2.3. Параметр 2. Приземная температура

Кроме статистики для ясных суток и ясных ночей, важным метеорологическим параметром, представленным в [6] для Суффы, является приземная температура. От нее зависят фазовые состояния атмосферной влаги, которая в основном и определяет условия распространения ММВ. На рис. 4 приведены средние значения приземной температуры в градусах Цельсия при облачности менее 2.5 балла за 1981–1991 гг. для Суффы [6] (синие точки), для полигонов с августа 2019 г. по январь 2020 г.: Карадаг – красные звездочки, Светлое – зеленые квадратики, Зеленчукская – лиловые крестики, Бадары – коричневые треугольники. Горизонтальная штриховая прямая показывает нулевой уровень температур. Температурные данные для полигонов взяты по собственным метеостанциям. Видно, что самые высокие температуры наблюдаются на Карадаге, самые низкие – в Бадарах и Суффе.

В рассматриваемый период все среднемесячные температуры на Карадаге являются положительными. На Суффе и всех полигонах ИПА РАН в осенне-зимний период появляются отрицательные температуры. Самые низкие температуры наблюдаются в Бадарах из-за резко континентального климата в центральной Сибири. Появляются они и на высокогорном плато Суффа (2335 м), несмотря на жаркий климат южного Узбекистана. Даже летом температуры для Суффы не превышают 16°C.



**Рис. 4.** Среднемесячные приземные температуры при облачности менее 2.5 балла за 1981–1991 гг.: для Суффы – синие точки, для других полигонов с августа 2019 г. по январь 2020 г.: Карадаг – красные звездочки, Светлое – зеленые квадратики, Зеленчукская – лиловые крестики, Бадары – коричневые треугольники.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В ОКНЕ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ 3 мм И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРЫ В АВГУСТЕ–ЯНВАРЕ 2019– 2020 ГГ. НА ПОЛИГОНЕ КАРАДАГ

В 2019–2020 гг. исследования атмосферного поглощения проводились на территории Крымского полуострова, на полигоне НИРФИ ННГУ Карадаг. Несмотря на небольшую высоту над уровнем моря (105 м – основная площадка, и 140 м – верхняя площадка), подтверждением целесообразности создания в 1966 г. радиоастрономической станции НИРФИ Карадаг (с 2020 г. полигон НИРФИ ННГУ Карадаг) явилось множество проведенных научных работ [11], включающих измерения радиоизлучения космических объектов с поверхности Земли на длинах волн вплоть до 8 мм. В этой связи было высказано предположение, что исследовательская площадка полигона Карадаг может быть использована также и в коротковолновом диапазоне миллиметрового спектра как для наблюдений космических

объектов, так и для установки станции космической связи. Для проверки такой возможности измерения атмосферного поглощения на территории полигона Карадаг начали проводиться с 2017 г. Результаты этих наблюдений опубликованы в [4, 12].

С учетом опыта измерений в 2017 и 2018 г. был создан новый радиометрический комплекс (РК), включающий радиометры на длинах волн 3 и 8 мм, а также профессиональную метеостанцию Davis Vantage Pro 2. С помощью РК на полигоне Карадаг были проведены измерения атмосферного поглощения с августа 2019 г. по январь 2020 г. Для обеспечения автономной круглосуточной работы комплекса в широком интервале температур был создан новый прочный корпус с системой термостабилизации и системой передачи данных через сеть Internet. В указанном выше временном интервале 2019–2020 гг. измерения проводились только одним 3 мм каналом радиометра, приемник 8 мм канала проходил режим апробации. Дальнейшие измерения планируются в двухволновом варианте.



В комплексе использован модуляционный радиометр с рабочей полосой частот от 92.5 до 96.4 ГГц. Амплитудно-частотная характеристика практически симметрична относительно центральной частоты и соответствует ширине полосы 2.3 ГГц [12].

Для измерений использовался метод атмосферных разрезов, который предполагает плоско-слоистую модель атмосферы. В этом случае яркостная температура атмосферы равна

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

где  $\tau$  – полное вертикальное поглощение в атмосфере,  $T_{\text{ср}}$  – средневзвешенная по коэффициенту поглощения температура атмосферы,  $\theta$  – зенитный угол; второй компонент обусловлен реликтовым космическим излучением. Его вклад 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

$$d(\theta) = kT_{\text{я}}(\theta) + A, \quad (2)$$

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

$$Y(\tau) = \frac{d(\theta_2) - d(\theta_1)}{d(\theta_3) - d(\theta_2)} = \frac{T_{\text{я}}(\theta_2) - T_{\text{я}}(\theta_1)}{T_{\text{я}}(\theta_3) - T_{\text{я}}(\theta_2)} = \frac{\exp\left(-\frac{\tau}{\cos\theta_2}\right) - \exp\left(-\frac{\tau}{\cos\theta_1}\right)}{\exp\left(-\frac{\tau}{\cos\theta_3}\right) - \exp\left(-\frac{\tau}{\cos\theta_2}\right)}. \quad (3)$$

Ранее, в [12], были проанализированы два метода получения атмосферного поглощения по атмосферному разрезу. В данном случае использована модификация второго метода с вычислением поглощения по излучению атмосферы для ряда углов от 0 до 80° от зенита, где выполняется приближение плоско-слоистой атмосферы, а также опорной области с яркостной температурой, близкой к температуре приземного воздуха. В качестве опорной области было использовано излучение горного склона.

Главное достоинство этой модификации второго метода состоит в том, что в таком варианте он позволяет получить в сочетании с методом наименьших квадратов статистически обоснованное среднее поглощение и ошибку измерений [13].

Преобразуем (1) к виду

$$T_{\text{ср}} - T_{\text{я}}(\theta) = T_{\text{ср}} \exp\left(-\frac{\tau}{\cos\theta}\right). \quad (4)$$

После логарифмирования (4) с использованием в качестве  $T_{\text{ср}}$  излучение опорной области  $d_0$  получим

$$\ln(d_0 - d(\theta)) = -\frac{\tau}{\cos\theta} + \ln(kT_{\text{ср}}). \quad (5)$$

Соотношение (5) по  $\tau$  линейное, что позволяет для его определения применить метод наименьших квадратов с получением статистически обоснованных погрешностей параметров [13]. Другим достоинством этой модификации данного метода является то, что для повышения точности измерений можно использовать любое количество углов в диапазоне  $0^\circ < \theta < 80^\circ$  от зенита. Ошибка измерений, которую дает метод наименьших квадратов, была использована как индикатор попадания отдельных облаков в диаграмму направленности антенны на некоторых углах. Это связано с тем, что, несмотря на отбор погодных ситуаций с облачностью менее 2.5 балла, облака могли попадать в диаграмму направленности антенны на отдельных углах. Введенный таким образом критерий позволил исключить из рассмотрения измерения, в которых полученная ошибка превышала 1% от среднего значения поглощения.

Измерения атмосферного поглощения радиометрическим методом позволяют получать интегральную влажность атмосферы. 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, и определяет погодные и климатические характеристики Земли, такие как температура, влажность, облачность, осадки, ветер.

Радиометрические методы зондирования атмосферы позволяют определять интегральное содержание водяного пара  $Q$  в столбе по собственному излучению (поглощению) радиоизлучения атмосферы в линиях поглощения водяного пара. Такие исследования проводятся часто в микроволновой линии поглощения водяного пара  $\nu = 22.23$  ГГц ( $\lambda = 1.35$  см). Однако спектральная линия  $\text{H}_2\text{O}$   $\lambda = 1.35$  см является достаточно слабой для измерения малых содержаний водяного пара  $Q$  в атмосфере. В этом случае предпочтительно использовать сильную линию поглощения

$\text{H}_2\text{O v} = 183 \text{ ГГц}$  ( $\lambda = 1.64 \text{ мм}$ ), а точнее, ее длинноволновый склон в диапазоне  $70\text{--}110 \text{ ГГц}$  ( $\lambda \approx 3 \text{ мм}$ ) в окне прозрачности между сильными линиями поглощения атмосферного кислорода  $60$  и  $120 \text{ ГГц}$ . В силу указанных обстоятельств чувствительность к изменению содержания водяного пара  $Q$  в линии  $1.64 \text{ мм}$  существенно выше, чем в традиционном диапазоне исследования  $\text{H}_2\text{O}$  в линии  $1.35 \text{ см}$ .

По определению, интегральное содержание водяного пара есть

$$Q = \int_0^{\infty} \rho_{\text{H}_2\text{O}}(h) dh, \quad (6)$$

где  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}(h)$  – вертикальный профиль абсолютной влажности. Согласно [14], коэффициент поглощения водяного пара  $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}(h)$  пропорционален абсолютной влажности

$$\alpha_{\text{H}_2\text{O}}(h) = \phi_{\text{H}_2\text{O}}(h) \rho_{\text{H}_2\text{O}}(h), \quad (7)$$

где  $\phi_{\text{H}_2\text{O}}(h)$  – удельный коэффициент поглощения водяного пара. Интегрируя (7) и применяя теорему о среднем, имеем

$$\begin{aligned} \tau_{\text{H}_2\text{O}} &= \int_0^{\infty} \alpha_{\text{H}_2\text{O}}(h) dh = \\ &= \int_0^{\infty} \phi_{\text{H}_2\text{O}}(h) \rho_{\text{H}_2\text{O}}(h) dh \approx \bar{\phi}_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) Q, \end{aligned} \quad (8)$$

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

На практике для обращения задачи используется регрессионное соотношение, связывающее полное поглощение с интегральным содержанием водяного пара  $Q$  и интегральным водосодержанием облаков  $W$ :

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) = \tau_{\text{O}_2}(\lambda) + \bar{\phi}_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) Q + \gamma(\lambda) W. \quad (9)$$

В (9) поглощение в кислороде  $\tau_{\text{O}_2}(\lambda)$  и эффективные значения удельного коэффициента поглощения в водяном паре  $\bar{\phi}_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$  рассчитываются заранее по квантово-механической теории поглощения в кислороде [15] и в водяном паре [14]. Для ясной атмосферы  $W = 0$ . В этом случае для определения вертикального поглощения  $\tau(\lambda)$  полностью применим метод атмосферных разрезов, изложенный выше.

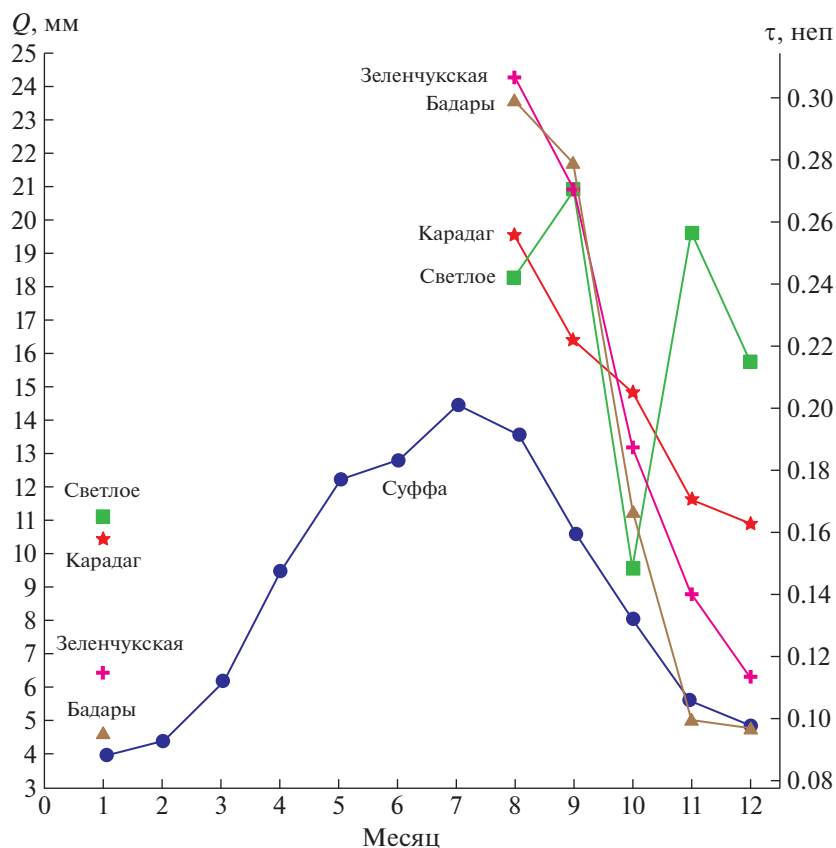
Для рабочей частоты радиометра  $\nu = 94 \text{ ГГц}$  значение  $\tau_{\text{O}_2}(\lambda) = 0.045$  и  $\bar{\phi}_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \approx 0.1076 \text{ см}^2/\text{г}$  и  $Q$  выражена в  $\text{г}/\text{см}^2$ . В радиоастрономии интегральное содержание водяного пара  $Q$  принято измерять в миллиметрах осажденной влаги, которая связана с  $Q$  в  $\text{г}/\text{см}^2$ , принятой в метеорологии, соотношением  $Q (\text{мм}) = 10Q (\text{г}/\text{см}^2)$ . В дальней-

шем интегральное содержание водяного пара будет приводиться в миллиметрах осажденной влаги.

На рис. 5 приведены результаты измерений интегрального содержания водяного пара (левая вертикальная ось) для плато Суффа (синие точки) согласно [6]. Правая вертикальная ось на рис. 5 показывает атмосферное поглощение в зените в диапазоне частот от  $92.5$  до  $96.4 \text{ ГГц}$ , использованном для измерений атмосферного поглощения на полигоне Карадаг, соответствующее интегральным влагосодержаниям на левой оси. Необходимо отметить, что для Суффы интегральное содержание водяного пара получено не радиометрическим методом, а по данным аэрологического зондирования за  $1981\text{--}1991 \text{ гг.}$

Радиометрические измерения на длине волны  $8 \text{ мм}$  на плато Суффа были использованы для построения корреляционной зависимости между приземным значением влажности и интегральным влагосодержанием. Зависимость была использована далее для получения интегральных влагосодержаний по приземной влажности в промежутках времени, где не было аэрологических данных [6]. По этой причине правая шкала на рис. 5 с поглощениями для длины волны  $3 \text{ мм}$  для Суффы носит не экспериментальный, а иллюстративный характер – она дает представление о том, какие поглощения на длине волны  $3 \text{ мм}$  имели бы место для плато Суффа в случае измерений. Мы не используем данные измерений атмосферного поглощения на плато Суффа на длинах волн  $3$  и  $2 \text{ мм}$ , приводимые в [16], так как в них не проведена селекция по облачности, а при обработке измерений использованы измерения на углах, больших  $80^\circ$  от зенита, где условия применимости плоско-слоистой модели не выполняются.

Данные измерений атмосферного поглощения на длине волны  $3 \text{ мм}$  на полигоне Карадаг и полученные по ним интегральные влагосодержания для периода с августа 2019 г. по январь 2020 г. показаны на рис. 5 красными звездочками. Из графиков видно, что среднемесячные содержания водяного пара для полигона Карадаг на  $5\text{--}7 \text{ мм}$  осажденной влаги больше, чем для Суффы. При выборе Суффы в качестве критерия использовались два параметра, показанные на рис. 1 и рис. 5. Сравнение этих параметров позволяет сделать вывод, что количество ясных суток на полигонах Суффа и Карадаг отличается несущественно, а содержание водяного пара на Карадаге на  $20\text{--}30\%$  больше, чем на Суффе. Однако необходимо отметить, что высота Карадага над уровнем моря  $100 \text{ м}$ , что в  $25$  раз меньше, чем у Суффы ( $2335 \text{ м}$ ). Таким образом, использование в данном случае высокогорья, в рамках стандартного подхода для выбора мест установки антенн ММВ диапазона, дает слабый эффект. В то же время сравнение данных по приземному значению температуры и



**Рис. 5.** Графики измерений интегрального влагосодержания при облачности менее 2.5 балла (левая шкала) за 1981–1991 гг. для Суффы – синие точки, для других полигонов с августа 2019 г. по январь 2020 г.: Карадаг – красные звездочки, Светлое – зеленые квадратики, Зеленчукская – лиловые крестики, Бадары – коричневые треугольники. Правая шкала показывает измерения атмосферного поглощения в диапазоне 3 мм для полигона Карадаг и иллюстрирует величины атмосферного поглощения, соответствующие интегральному влагосодержанию (левая шкала) для Суффы и полигонов ИПА РАН, если бы такие измерения там проводились в диапазоне 3 мм. Спад интегральных влагосодержаний в зимний период для Суффы и полигонов ИПА РАН связан с переходом к отрицательным температурам (см. рис. 4).

интегральному влагосодержанию на рис. 4 и 5 для Суффы и Карадага показывает, что при одинаковых температурах примерно равны и интегральные влагосодержания. Например, на рис. 4 приземные температуры в августе для Суффы примерно равны температуре октября для Карадага, а на рис. 5 интегральные влагосодержания для Суффы в августе примерно равны интегральному влагосодержанию для Карадага в октябре. Таким образом, данный пример показывает, что приземная температура является одним из основных факторов влияния на интегральное влагосодержание, в том числе в высокогорье. Средние летние температуры на плато Суффа из-за высокогорья равны 14–16°C, хотя рядом находится Ферганская долина с высокими летними температурами. В зимний период приземные температуры для Суффы становятся отрицательными в отличие от Карадага, и основным фактором, который приводит к уменьшению инте-

грального влагосодержания зимой для Суффы, является вымораживание. При отрицательных температурах водяной пар в атмосфере кристаллизуется, а поглощение в ледяных кристаллах существенно меньше, чем в водяном паре. Это также подтверждает тот факт, что основным фактором, который определяет выбор места в рамках стандартного подхода, являются низкие приземные температуры.

Таким образом, последовательное применение обычного подхода к выбору мест установки антенн ММВ приводит к местам с холодным климатом. Установка радиотелескопа ММВ на Южном полюсе является результатом последовательного выполнения этого принципа. Для территории РФ это места с холодным климатом и длинной зимой. Для проверки достаточности этого условия в следующем разделе мы рассмотрим условия распространения ММВ для трех по-

лигонов ИПА РАН, расположенных в различных климатических зонах РФ.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ИНТЕГРАЛЬНОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ПОЛИГОНАХ ИПА РАН ПО ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКЕ СИГНАЛА В СИСТЕМАХ ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Для сравнительного анализа условий распространения ММВ в различных местах желательно иметь для них результаты одновременных измерений интегрального влагосодержания атмосферы. Целесообразно также проводить измерения однотипной аппаратурой, по единой методике. В ИПА РАН был разработан специальный прибор “Радиометр водяного пара” для измерения интегрального влагосодержания атмосферы в линии поглощения водяного пара 1.35 см [17, 18]. Основная цель создания прибора – повышение точности измерений координат в системе точного позиционирования ГЛОНАСС [19]. К сожалению, результаты измерений атмосферного поглощения этим прибором для полигонов ИПА РАН не опубликованы. Поэтому для сравнительного анализа условий распространения ММВ были использованы имеющиеся в открытом доступе данные измерений тропосферной задержки сигнала для полигонов ИПА РАН [5].

Система точного позиционирования ГЛОНАСС работает в дециметровом диапазоне. Для длин волн  $\lambda \geq 1$  мм тропосферная задержка сигнала  $\Delta l$  описывается соотношением [19]:

$$\begin{aligned} \Delta l [\text{см}] &= \int_0^{H_A} (n - 1) dl = \\ &= \sec \theta (0.2279 P_0 [\text{гПа}] + 0.109 Q [\text{г/см}^2] + \\ &+ \frac{1730}{T_Q [\text{К}]} Q [\text{г/см}^2] + 0.145 W [\text{кг/м}^2]). \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь  $n$  – коэффициент преломления воздуха,  $H_A$  – высота атмосферы,  $P_0$  – приземное давление,  $T_Q$  – средневзвешенная по абсолютной влажности температура атмосферы,  $W$  – интегральное водосодержание облаков. Первый компонент в (10) описывает гидростатический компонент, который иногда неверно называют “сухим” и который определяется не только сухим компонентом коэффициента преломления атмосферного воздуха, но и недипольным компонентом коэффициента преломления водяных паров. По этой причине он зависит от приземного давления атмосферы, включая и парциальное давление водяных паров. Процедура определения интегрального влагосодержания по тропосферной задержке сигнала систем точного позициониро-

вания описана в [20]. Из (10) на основе данных о полной тропосферной задержке в зените  $\Delta l_{ZPD}$  (tropospheric zenith path delay, см) из [5] и гидростатическом компоненте  $\Delta l_{DPD}$  (dry troposphere path delay, см), описываемом первым компонентом в (10), в условиях ясной погоды  $W \approx 0$  интегральное влагосодержание определяется соотношением

$$Q [\text{г/см}^2] = \frac{\Delta l_{ZPD} - \Delta l_{DPD}}{0.109 + \frac{1730}{T_Q [\text{К}]}}. \quad (11)$$

Температуру  $T_Q$  можно получить, например, из регрессионного соотношения  $T_Q = CT_0 + B$ , где  $T_0$  – приземная температура, а  $C$  и  $B$  рассчитываются по массиву данных аэрологического зондирования [19]. Но в рамках данной задачи по сравнению интегрального влагосодержания в разных климатических зонах РФ с приемлемой точностью можно заменить  $T_Q$  на  $T_0$ .

Как уже упоминалось, данные о тропосферной задержке в [5] представлены не для всех дней месяца, однако для некоторых дат приводится несколько записей. По-видимому, представлены данные для дней с лучшими погодными условиями. При наличии нескольких записей в день рассматривалась запись, которая была размещена последней на сайте [5]. Остальные записи в этот промежуток времени исключались из рассмотрения, чтобы не исказить статистику повторяемости интегрального влагосодержания. В некоторых записях при отрицательных поверхностных температурах были получены отрицательные интегральные влагосодержания. Очевидно, что этого не может быть, и эффект связан с тем, что измеренная тропосферная задержка  $\Delta l_{ZPD}$  оказывается меньше гидростатической  $\Delta l_{DPD}$ . Такие записи исключались из рассмотрения. Возможной причиной может быть неправильно указанная дата наблюдений на сайте [5].

Полученные из (11) интегральные влагосодержания для полигонов ИПА РАН с августа 2019 г. по январь 2020 г. показаны на рис. 5 в единицах “мм осажденной влаги” (левая вертикальная ось): Светлое – зеленые квадратики, Зеленчукская – лиловые крестики, Бадары – коричневые треугольники. Правая ось носит иллюстративный характер и соответствует поглощению в зените на 94 ГГц для полигонов ИПА РАН, а также для Суффы. Она характеризует ожидаемые значения поглощений при измерениях на этой частоте в соответствующем месте в указанный промежуток времени. Как видно из графика, интегральные влагосодержания в летне-осенний период для полигонов ИПА превышают соответствующие значения для Суффы и Карадага. Резкие колебания интегрального влагосодержания по месяцам для

Светлого очевидно связаны с неустойчивыми погодными условиями в северной части европейской части РФ в 2019 г. В зимний период, при наступлении отрицательных температур (рис. 4), интегральные влагосодержания на полигонах ИПА РАН уменьшаются из-за вымораживания. Особенно это характерно для Бадар, где температуры падают до  $-20^{\circ}\text{C}$  (резко континентальный климат центральной Сибири). Однако эффект наблюдается в ограниченный промежуток времени из-за небольшого количества ясных суток в этот период (рис. 1).

В рамках подхода, использованного при выборе плато Суффа для установки антенны ММВ, анализ полученных результатов натурных измерений в августе–январе 2019–2020 гг. свидетельствует, что полигон Карадаг (юго-восточный Крым) является предпочтительным местом для установки антенны ММВ на территории РФ по сравнению со всеми тремя полигонами ИПА РАН, расположенными в различных климатических зонах РФ. Их местоположение было указано во введении. В рамках данного подхода полигон Карадаг имеет сравнимое количество ясных суток с плато Суффа, но уступает по средним значениям интегрального влагосодержания. Необходимо отметить, что важным преимуществом полигона Карадаг является транспортная доступность. Этот фактор, а также положительные средние температуры удешевляют строительство и эксплуатацию антенн ММВ.

Как было указано в [4], подход, обычно используемый при выборе мест для установки антенн ММВ – высокогорные плато, низкие температуры, не является единственным. Среднемесячные значения интегрального влагосодержания являются довольно грубой характеристикой условий распространения ММВ. В следующем разделе рассмотрим альтернативный подход к выбору мест установки антенн ММВ.

## 5. АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ МЕСТ УСТАНОВКИ АНТЕНН ММВ

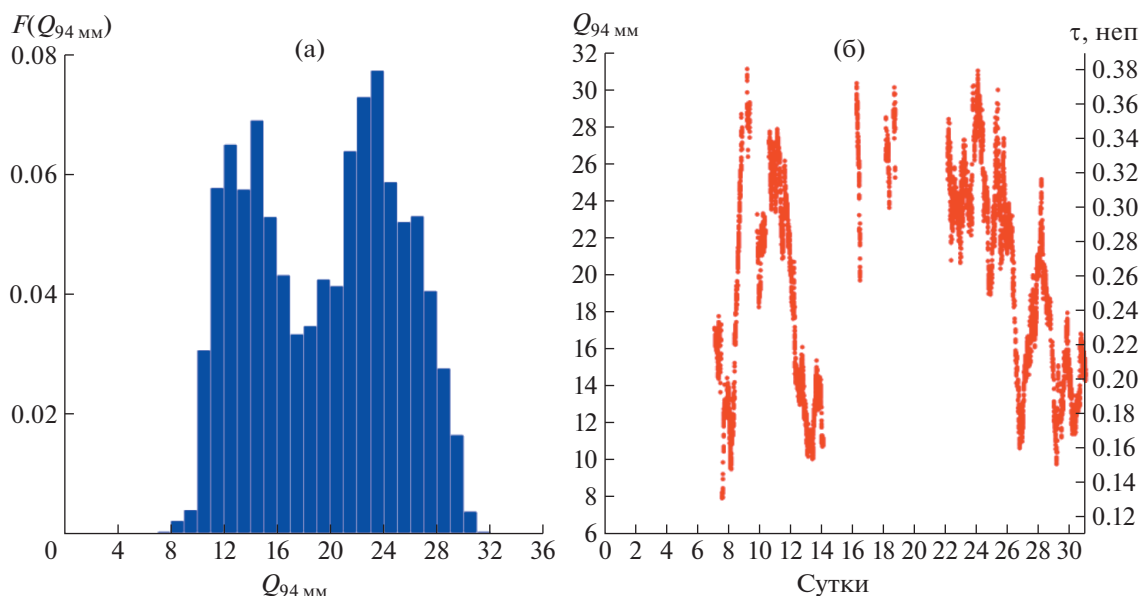
Поскольку основное содержание влаги в атмосфере приходится на пограничный слой  $\Delta h \approx 2.5$  км, определяющим условием к выбору пунктов установки антенн ММВ является локальный климат конкретной территории, который в значительной степени может минимизировать влияние атмосферного поглощения. Поэтому альтернативная концепция может заключаться в выборе места со специфической розой ветров, доставляющей сухой воздух к пункту установки инструмента. Подобный подход был применен при строительстве 64-метрового радиотелескопа на о. Сардиния (Италия), расположенного на высоте всего 600 м над уровнем моря и предназначенного для работы до длины волн 3 мм. При

выборе места установки был учтен засушливый климат острова.

Как уже упоминалось ранее, на основе проведенных в начале XX века исследований поглощения атмосферы [7] в середине 1960-х годов в 13 км от Старого Крыма у подножия горы Балалы-Кая Карадагского горного массива была создана радиоастрономическая станция (РАС) Карадаг Научно-исследовательского радиофизического института [11] (с 2020 г. полигон Карадаг). Для проверки оптимального размещения станции здесь уже проводились циклы измерений атмосферного поглощения в 2017 и 2018 г. [4, 12]. На основе анализа результатов предыдущих исследований можем сказать, что преобладание именно на Карадаге северного ветра вообще и в ночное время, в частности [9, 21], даже если днем ветер дует с юга, создает на территории РАС Карадаг благоприятные условия для ночных астрономических наблюдений.

Статистической характеристикой повторяемости измеренных значений поглощения атмосферы в диапазоне 3 мм являются гистограммы. Исходя из описанных выше особенностей расположения полигона в горном массиве Карадаг и розой ветров на Крымском полуострове в [4] был проведен более детальный анализ связи гистограмм атмосферного поглощения на полигоне Карадаг с метеоусловиями. Анализ показал, что при северных ветрах и ясном небе характер гистограмм может существенно отличаться от типичных унимодальных. На рис. 6а показана гистограмма измерений в диапазоне 3 мм интегрального влагосодержания  $Q_{94\text{ мм}}$  (в мм осажденной влаги) на полигоне Карадаг за август 2019 г.

Гистограмма  $F(Q_{94\text{ мм}})$  на рис. 6а построена по 5655 измерениям с усреднением по  $Q_{94\text{ мм}} = 1$  мм. Видно, что гистограмма имеет два максимума. Причину иллюстрирует временная зависимость интегрального влагосодержания за август 2019 г., представленная на рис. 6б (по горизонтальной оси отложено время в долях суток с начала месяца). Правая часть гистограммы с большими влагосодержаниями на рис. 6б формируется участками записи, для которых характерно нарушение местной воздушной циркуляции циклоном (разрывы в записи соответствуют сильной облачности). Левая часть гистограммы с малыми влагосодержаниями на рис. 6б формируется участками записи, характерными для местной атмосферной циркуляции на полигоне Карадаг. В соответствии с анализом [4] на этих участках наблюдаются суточные вариации атмосферного поглощения. Низкие значения поглощения соответствуют ночному времени суток. Сравнение величин интегрального влагосодержания в левом максимуме на рис. 6а со средними значениями в августе ме-



**Рис. 6.** а) Гистограмма измеренных значений интегрального влагосодержания в атмосфере в миллиметрах осажденной влаги для длины волны 3 мм на полигоне Карадаг с двумя максимумами за август 2019 г. Гистограмма  $F(Q_{94 \text{ мм}})$  построена по 5655 измерениям, с усреднением по  $Q_{94 \text{ мм}} = 1 \text{ мм}$ ; б) временная зависимость (горизонтальная ось в долях суток с начала месяца) значений интегрального влагосодержания в атмосфере в миллиметрах осажденной влаги на полигоне Карадаг за август 2019 г.

сяце на плато Суффа, представленные на рис. 5, показывает, что условия наблюдений при северных ветрах и ясном небе для полигона Карадаг сравнимы с плато Суффа, расположенным на высоте 2335 м над уровнем моря.

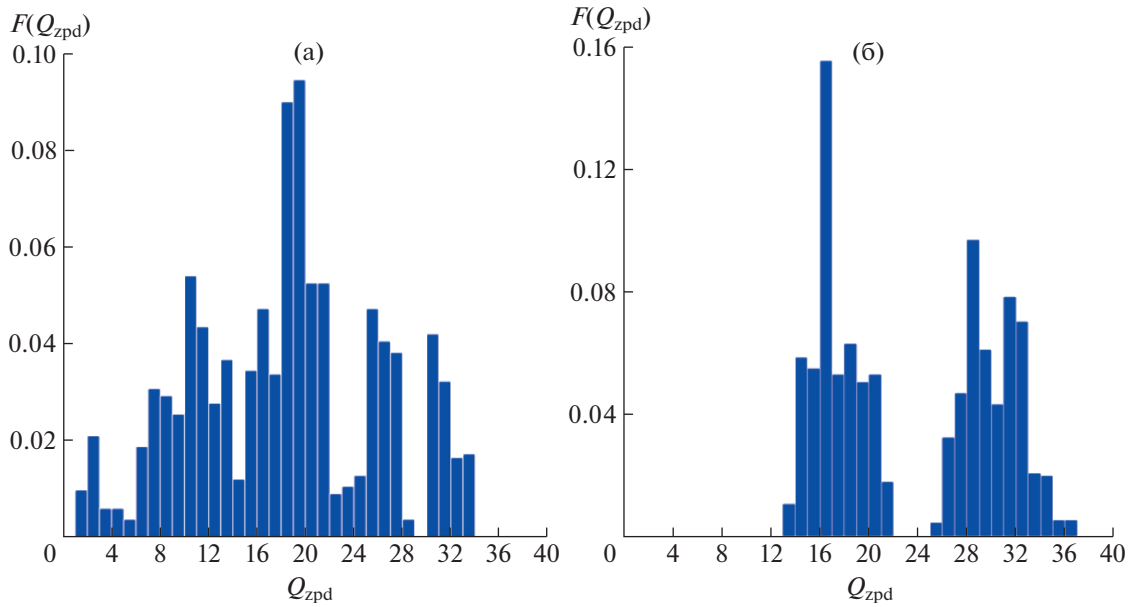
Ранее [4] уже отмечалось, что измерения на полигоне Карадаг летом 2017 г. и измерения 2019 г. проводились в условиях погодной аномалии, при циклонической активности. Однако для стандартных погодных условий Крымского лета — низкая влажность и отсутствие дождей, ситуации, описываемые рис. 6а, будут наблюдаться в большем проценте случаев. Аномально дождливое лето 2017 г. и циклон 2019 г. не являются свидетельствами изменения климатических условий. Такие погодные аномалии наблюдались на Карадаге и ранее, хотя и являются довольно редким явлением. По данным [9], в XX столетии самым влажным был 1968 год. Кроме того, в числе наиболее дождливых называют 1935, 1973, 1976, 2002, 2005 гг. Однако, как уже отмечалось в разделе 2, количество осадков на Карадаге уменьшилось в период 2012–2018 гг., по сравнению с периодом 2000–2011 гг. [10] на 33.7 мм, что существенно и формирует в целом более засушливые условия среды.

Как видно из рис. 6б, в некоторых ситуациях интегральное влагосодержание падает до 7–9 мм осажденной влаги, что является хорошим показателем, сравнимым со средними зимними значе-

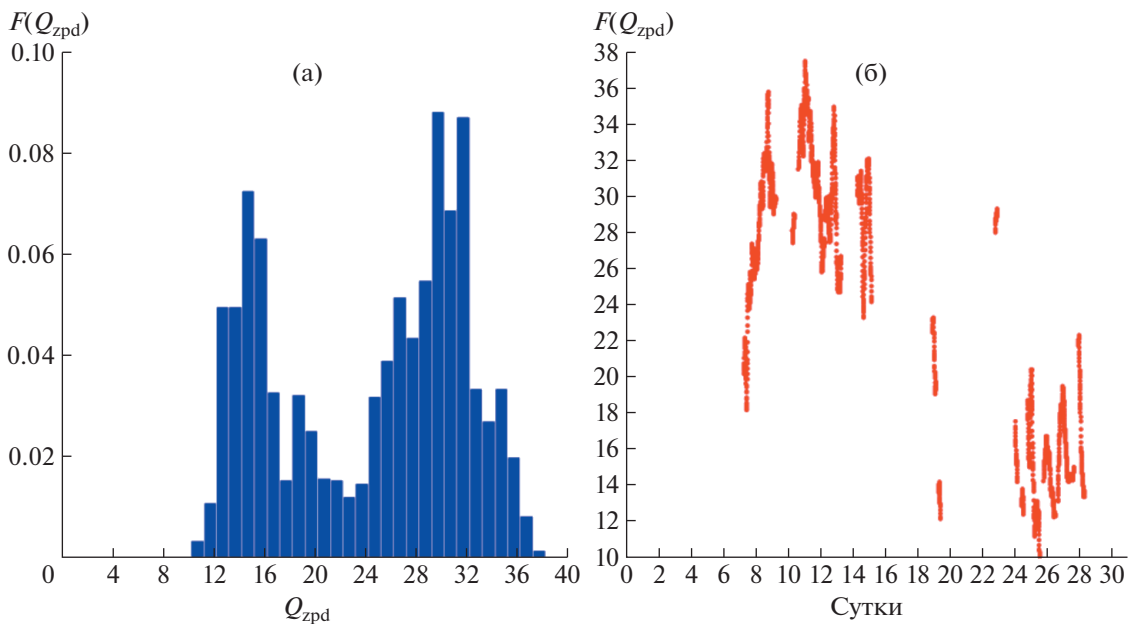
ниями для высокогорных телескопов [22]. Необходимо отметить, что это достигается в летний период при положительных температурах, что существенно упрощает создание и эксплуатацию такого сложного и дорогостоящего оборудования, как приемники и антенны ММВ. Таким образом, среднемесячные значения интегрального влагосодержания, использовавшиеся при выборе плато Суффа [6], не всегда адекватно описывают ситуацию с условиями распространения ММВ.

Следует отметить также, что изрезанность гистограмм может быть вызвана различными причинами. На рис. 7 показаны гистограммы интегрального влагосодержания в августе 2019 г. для полигонов Светлое (рис. 7а) и Бадары (рис. 7б). Эффект изрезанности связан здесь со значительным количеством облачных ситуаций в этих климатических зонах РФ в августе 2019 г. В данном случае среднемесячные значения интегрального влагосодержания на рис. 5 для этих полигонов являются единственным способом адекватно описать имевшуюся погодную ситуацию. Для уточнения средних значений необходима большая статистика, включающая несколько лет.

На рис. 8а показана гистограмма интегрального влагосодержания для полигона Зеленчукская, а на рис. 8б — соответствующая временная зависимость. В данном случае резкое изменение интегрального влагосодержания в середине месяца может быть вызвано как прохождением погодно-



**Рис. 7.** Гистограммы измеренных значений интегрального влагосодержания в атмосфере в миллиметрах осажденной влаги для полигонов Светлое (а) и Бадары (б).



**Рис. 8.** а) Гистограмма измеренных значений интегрального влагосодержания в атмосфере в миллиметрах осажденной влаги на полигоне Зеленчукская с двумя максимумами за август 2019 г. Гистограмма  $F(Q_{zpd})$  построена по 2665 измерениям, с усреднением по  $Q_{zpd} = 1$  мм; б) временная зависимость (горизонтальная ось в долях суток с начала месяца) значений интегрального влагосодержания в атмосфере в миллиметрах осажденной влаги на полигоне Зеленчукская за август 2019 г.

го фронта с наносом сухого воздуха, имеющего случайный характер, так и особенностями местной атмосферной циркуляции, связанной с гор-

ным рельефом вблизи полигона. Для ответа на эти вопросы по полигонам ИПА РАН нужны дальнейшие исследования.

Представленные в разделе результаты показали целесообразность внимательного отношения к дополнительным факторам при выборе места для расположения антенн миллиметрового диапазона. Учет среднемесячных значений интегрального влагосодержания атмосферы является необходимой, но не всегда достаточной характеристикой. Альтернативная концепция может заключаться в выборе места со специфической розой ветров, при которой обеспечивается доставка сухого воздуха к пункту установки инструмента. Кроме того, предложенный измерительный комплекс [12] способен поддержать альтернативный подход по сравнению с размещением инструментов в холодных зонах или подъему их в горы. В радиоастрономических обсерваториях повсеместно используется модуляционный метод калибровки посредством переключения входного тракта приемника с антенны на нагрузку с известной температурой (метод *chopper-wheel* [23]). Он состоит в том, что перед первым усилителем в тракт включается так называемый *chopper* — это переключатель (возможно, механический), который поочередно подключает к приемнику выход антенны и чернотельную нагрузку комнатной температуры. Исторически на миллиметровых волнах он стал применяться ввиду отсутствия в данном диапазоне соответствующих диодных шумовых генераторов, сигналы которых используются для калибровок. Величина ступеньки подмешанного во входной тракт сигнала генератора шума определяется по двум нагрузкам: горячей (при комнатной температуре) и холодной (жидкий азот) и при его стабильности затем используется в процессе измерений. Генератор шума не перекрывает входной тракт и излучение атмосферы не влияет на величину калибровочной ступеньки. Но *chopper*, который на миллиметрах используют вместо генератора шума, перекрывает входной тракт, и калибровочная ступенька равна разности сигналов от черного тела и сигнала от атмосферы. При этом формулу для обработки калибровочного сигнала почему-то оставили без изменений (см. [23]). По этой причине при усилении излучения атмосферы калибровочная ступенька уменьшается и это частично компенсирует увеличение антенной температуры из-за роста излучения атмосферы. Поскольку яркостная температура атмосферы при этом не измеряется, рассуждения носят качественный характер, и определить вклад атмосферы в температуру антенны на источнике невозможно. В этом случае вклад атмосферы является частью ошибки калибровки. В [23] отмечено, что точность такой калибровки составляет 5–10%. Между тем, реализация двухтемпературной калибровки позволяет разделить шумы приемника и атмосферы, измерить параметры атмосферы и повысить точность калибровки до 1%. В этом случае параметры атмосферы измеряются штат-

ным радиоастрономическим приемником, но атмосфера изменчива, увеличение количества двухтемпературных калибровок для следования за переменами будет существенно усложнять процесс. Наличие атмосферного измерительного комплекса позволяет определять параметры атмосферы в реальном масштабе времени без использования двухтемпературной калибровки и повысить точность калибровки на порядок.

На Карадаге при наблюдениях на длине волны 8 мм применялся, по нашему мнению, более совершенный вариант метода *chopper-wheel*. Переключение производилось между двумя облучателями в фокусе антенны. Диаграмма одного облучателя была направлена на источник, другая на опорную область. При измерении разности сигналов между наведением на источник и на опорную область излучение атмосферы присутствует в обоих случаях и вычитается. Переключение должно выполняться быстро, чтобы атмосфера не успела измениться. Однако, вероятно, что на больших антеннах могут возникать сложности с реализацией этой процедуры. Заметим, что в *chopper-wheel* переключение происходит после антенны, поэтому антенна не калибруется. В [23] приведены потоки излучения от планет для реализации внешней калибровки, которая позволяет учитывать параметры антенны. Однако остается вопрос о стабильности излучения планет.

В процессе дальнейшего совершенствования радиометрического комплекса дистанционного зондирования атмосферы, который сейчас работает на полигоне Карадаг, нами добавлен второй частотный канал на длину волны 8 мм. Реализованное при этом трехкратное разнесение частот каналов позволяет одновременно измерять как интегральное влагосодержание  $Q$ , так и капельную фракцию облаков  $W$ , используя разницу в частотной зависимости поглощения в водяном паре и капельной фракции облаков в (9).

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследования интегрального влагосодержания, полученного по измерениям атмосферного поглощения в диапазоне длин волн 3 мм на полигоне Карадаг (Республика Крым) с августа 2019 г. по январь 2020 г. Проведен сравнительный анализ условий распространения ММВ на основе характеристик, использованных в 80-х годах XX века для выбора места расположения 70-м антенны миллиметрового диапазона для плато Суффа, полигона Карадаг и трех полигонов ИПА РАН.

1. Показано, что по количеству ясных дней и ночей Карадаг и Суффа сопоставимы и превосходят полигоны ИПА РАН, расположенные на Северном Кавказе (Зеленчукская), севере европей-



ской части РФ (Светлое) и Центральной Сибири (Бадары).

2. Проведен сравнительный анализ значений интегрального влагосодержания, определяющих условия распространения ММВ: для Карадага (август–январь 2019–2020 гг. по измерениям атмосферного поглощения в диапазоне 3 мм), для Суффы (средние за 1981–1991 гг. по аэрологическим данным), для трех полигонов ИПА РАН (Светлого, Зеленчукской и Бадары, август–январь 2019–2020 гг. по измерениям тропосферной задержки в системах точного позиционирования). Сравнение данных для Карадага и Суффы показывает, что одним из основных факторов, связанных с интегральным влагосодержанием, является приземная температура. На этих двух площадках при близких температурах наблюдаются сравнимые интегральные влагосодержания. Показано, что подъем антенны на гору (плато Суффа) влияет на интегральное влагосодержание, однако не слишком значительно, через уменьшение поверхностной температуры. В летне-осенний период среднемесячные интегральные влагосодержания на Карадаге на 5–7 мм осажденной влаги больше, чем для Суффы, что связано с низкими летними температурами на плато (высота 2335 м). Показано также, что в летне-осенний период по этому критерию Карадаг уступает Суффе, но превосходит полигоны ИПА РАН. Низкие интегральные влагосодержания для Суффы и полигонов ИПА РАН наблюдаются в зимний период при отрицательных температурах. В итоге следует вывод, что последовательное применение принципов сравнительного анализа, использованных при выборе плато Суффа, для выбора места расположения антенн миллиметрового диапазона приводит к местам с холодным климатом и длинной зимой с отрицательными температурами. Однако на практике необходимо принимать во внимание два сопутствующих негативных фактора: (1) наличие в большинстве климатических зон РФ значительной вероятности числа облачных ситуаций; (2) затруднение эксплуатации прецизионной техники миллиметрового диапазона при отрицательных температурах, а также значительное повышение из-за этого расходов на строительство инструментов.

3. Показано также, что использование среднемесячных значений интегрального влагосодержания на полигонах является слишком грубой характеристикой. В частности, из-за специфической розы ветров на полигоне Карадаг периодически возникает высокая прозрачность воздуха. В результате даже в летнее время интегральное влагосодержание падает до уровней, сопоставимых с Суффой и другими высокогорными телескопами. В этой связи следует учитывать более детальное ежесуточное и внутрисуточное рас-

пределение результатов измерений влагосодержания.

4. Кроме того, альтернативой выбору площадок для размещения инструментов в холодных зонах и подъему их в горы может способствовать реализация предложенного в [12] измерительного комплекса для коррекции в реальном времени наблюдательных данных на атмосферное поглощение и более точные калибровки радиотелескопов мм диапазона длин волн.

Полученные результаты позволяют скорректировать существующие принципы размещения систем космической связи и астрономических инструментов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, проводя поиск новых площадок в местах с подходящей розой ветров. Представляется также целесообразным провести реализацию систематических атмосферных измерений на полигоне Карадаг предложенной двухчастотной системой в диапазоне ММВ (3 и 8 мм).

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проекты в рамках базовой части Государственного задания ННГУ 0729-2020-0057, и ИФМ РАН 0035-2014-0206, а также ФИЦ ИнБЮМ 0556-2019-0006).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Р. П. Быстров, А. В. Петров, А. В. Соколов*, Журн. радиоэлектроники № 5, 3 (2000).
2. *G. B. Sholomitskii, I. A. Maslov, and V. M. Grozdilov*, Soviet Astron. **26**, 358 (1982).
3. *A. V. Lapinov, S. A. Lapinova, L. Yu. Petrov, and D. Ferrusca*, in *Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X* **11453**, 114532 (2020).
4. *И. Т. Бубукин, И. В. Ракуть, М. И. Агафонов, А. Л. Панкратов, и др.*, ЖЭТФ **156**, 43 (2019).
5. [https://cddis.nasa.gov/Data\\_and\\_Derived\\_Products/CDDIS\\_Archive\\_Access.html](https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/CDDIS_Archive_Access.html)
6. <http://asc-lebedev.ru/index.php?dep=16&suffa=3>
7. *В. Е. Панчук, В. Л. Афанасьев*, Астрофиз. бюлл. **66**(2), 253 (2011).
8. <https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewHome>
9. *М. М. Бескаравайный, Н. С. Костенко, Л. П. Миронина, Л. Я. Партыка, В. Н. Голубев, В. М. Зубаровский, А. М. Пекло, Природа Карадага* (Киев: Наукова думка, 1989).
10. *А. В. Зуев, В. Ю. Летухова, Е. А. Зуева*, Тр. Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН **13**, 77 (2020).
11. *С. Д. Снегирев, В. М. Фридман, О. А. Шейнер, Первый в стране Радиофизический институт (от создания до наших дней)* (Нижний Новгород: ФГБНУ НИРФИ, 2016).

12. *И. Т. Бубукин, М. И. Агафонов, И. В. Ракуть, А. Л. Панкратов, А. А. Яблоков, А. В. Троицкий, А. С. Приймак, Р. В. Горбунов*, Изв. ВУЗов. Радиофизика **62**(7–8), 630 (2019).
13. *В. М. Иванова, В. Н. Калинина, Л. А. Нешумова, И. О. Решетникова*, Математическая статистика (М.: Высшая школа, 1981).
14. *В. Ю. Катков*, Радиотехника и электроника **42**(12), 1441 (1997).
15. *P. W. Rosenkranz*, J. Quant. Spectroscop. Radiative Transfer **39**(4), 287 (1988).
16. *Г. М. Бубнов, Ю. Н. Артеменко, В. Ф. Вдовин, Д. Б. Данилевский, и др.*, Изв. ВУЗов. Радиофизика **59**(8–9), 852 (2016).
17. <http://iaaras.ru/quasar/wvr/>
18. *Г. Н. Ильин, А. В. Троицкий*, Изв. ВУЗов. Радиофизика **60**(4), 326 (2017).
19. *M. Bevis, S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware*, J. Geophys. Res. Atmospheres **97**(D14), 15787 (1992).
20. *J. L. Davis, T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. E. Rogers, and G. Elgered*, Radio Science **20**(6), 1593 (1985).
21. *Г. С. Курбасова, А. Е. Вольвач*, Наука вчера, сегодня, завтра № 4, 79 (2016).
22. <https://www.iram-institute.org/>
23. *P. R. Jewell*, Astron. Soc. Pacific Conf. Ser. **278**, 313 (2002).