

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.876+551.51

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД РАЗРЕЗОВ ПРИ СРАВНИТЕЛЬНОМ ИССЛЕДОВАНИИ ПЛОЩАДОК ДЛЯ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ И РАДИОАСТРОНОМИИ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН¹

© 2024 г. И. Т. Бубукин^{a, *}, И. В. Ракуть^{a, b}, М. И. Агафонов^{a, b}, А. Л. Панкратов^{a, b, c},
Т. Ю. Горбунова^d, Р. В. Горбунов^d, В. И. Бубукин^b

^aНаучно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского,
ул. Большая Печерская, 25/12а, Нижний Новгород, 603950 Российская Федерация

^bНижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
ул. Минина, 24, Нижний Новгород, 603155 Российская Федерация

^cИнститут физики микроструктур РАН,
ул. Академическая, 7, Нижний Новгород, 603087 Российская Федерация

^dИнститут биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН,
просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011 Российская Федерация

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

Поступила в редакцию 28.10.2023 г.

После доработки 19. 05. 2023 г.

Принята к публикации 25.05.2024 г.

Проведены измерения атмосферного поглощения в окнах прозрачности в диапазоне миллиметровых волн (ММВ). Предложен модифицированный метод разрезов, позволяющий измерять атмосферное поглощение, среднюю температуру атмосферы и разделять вклады атмосферной влаги и капельной фракции облаков по одноволновым измерениям в диапазоне ММВ при облачности до 2.5 балла (без осадков). Показана возможность обнаружения и определения водности облаков в зените в реальном масштабе времени. Получен годовой ход влагосодержания атмосферы и атмосферного поглощения на длине волны 3 мм (2019 г. и 2020–2021 гг.) для полигона «Карадаг». Подтверждаются полученные ранее результаты сравнительного анализа полигона «Карадаг» и плато Суффа. Показана возможность использования полигона «Карадаг» для установки систем космической связи и измерений космических источников в диапазоне ММВ.

Ключевые слова: погода, климат, излучение атмосферы, дистанционное зондирование, влагосодержание, миллиметровые волны, космическая связь

DOI: 10.31857/S0033849424060038, **EDN:** IKGHOS

ВВЕДЕНИЕ

Существенное развитие технологий приема и усиления слабых сигналов в миллиметровом диапазоне длин волн в последнее время 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.

Преимуществами 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 способствуют повышению скрытности связи и подавлению интерференционных помех.

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.

¹ Работа доложена на XXVIII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» (23–26 мая 2023 г., Йошкар-Ола).

Для реализации в Российской Федерации спутниковых систем связи в диапазоне ММВ необходимо создание наземной инфраструктуры, обеспечивающей прием и передачу спутниковой информации в диапазоне ММВ. В последние годы в Научно-исследовательском радиофизическом институте ННГУ им. Н. И. Лобачевского (НИРФИ ННГУ) была проведена серия измерений атмосферного поглощения на полигоне «Карадаг» (юго-восточный Крым) и показано, что существующие атмосферные особенности (наложение местного северного ветра, горно-долинной и бризовой циркуляции) создают там благоприятные условия для наблюдений в диапазоне ММВ длин волн [1–4].

Цель данной работы – обосновать возможность использования полигона «Карадаг» для установки систем космической связи и измерений космических источников в диапазоне ММВ на основе обобщения опыта длительных (более 1.5 лет) измерений распространения ММВ на этом полигоне.

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Использованы результаты измерений атмосферного поглощения, полученные авторами на полигоне «Карадаг» в диапазоне 92.5...96.4 ГГц [3] с июля по декабрь 2020 г., с августа 2019 по январь 2020 г. и с января по июль 2021 г. [4]. Ранее, в 1981–1991 гг., аналогичные работы проводились для выбора места размещения радиотелескопа миллиметрового диапазона с 70-метровым основным рефлектором РТ-70 проекта П-2500 и по результатам исследований инструмент решено было разместить в обсерватории на плато Суффа [5] (полученные измерения интегрального влагосодержания на плато Суффа обычно используются для сравнения условий распространения ММВ).

В данной работе для измерений использован модифицированный метод атмосферных разрезов, который предполагает плоскостную модель атмосферы. Решение уравнения переноса излучения в атмосфере Земли имеет вид интеграла по траектории распространения волны [6]. Плоскостная модель атмосферы позволяет заменить интеграл по криволинейной траектории интегралом по прямой линии. Тогда решение уравнения переноса

излучения для нисходящей траектории в терминах яркостной температуры $T_{\text{я}}$ может быть преобразовано к виду [6]

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

где τ – полное вертикальное поглощение в атмосфере, $T_{\text{ср}}$ – средневзвешенная по коэффициенту поглощения температура атмосферы, θ – зенитный угол, вторая компонента обусловлена реликтовым космическим излучением с $T_r = 2.73\text{K}$.

По результатам натурных измерений 2019–2022 гг. и анализа методов получения атмосферного поглощения по атмосферному разрезу [7–9] был разработан модифицированный метод разрезов с вычислением τ и $T_{\text{ср}}$ по излучению атмосферы для ряда углов θ от 0° до 80° от зенита (для длины волны 3 мм). Все алгоритмы обработки данных, полученных методом атмосферных разрезов, основаны на использовании безразмерных отношений приращений сигналов на выходе радиометрического приемника при сканировании по зенитному углу, так как сигнал на выходе радиометра связан с яркостной температурой калибровочным соотношением

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

где k и A – калибровочные коэффициенты. Также используется излучение опорной области d_0 с яркостной температурой, близкой к температуре приземного воздуха T_0 . После преобразования и логарифмирования (1) с использованием в качестве $T_{\text{ср}}$ излучения опорной области d_0 получим

$$\ln(d_0 - d(\theta)) = -\frac{\tau}{\cos \theta} + \ln(k(T_{\text{ср}} - T_r)). \quad (3)$$

Соотношение (3) по τ линейное, что позволяет для его определения применить метод наименьших квадратов с получением статистически обоснованных погрешностей параметров. Текущее значение $T_{\text{ср}}$ также может быть определено по тем же измерениям атмосферного разреза с помощью соотношения [9]

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_0 - T_r \left[\exp(-\tau \sec \theta_2) \frac{d_0 - d(\theta_1)}{d(\theta_2) - d(\theta_1)} - \exp(-\tau \sec \theta_1) \frac{d_0 - d(\theta_2)}{d(\theta_2) - d(\theta_1)} \right]}{1 - \left[\exp(-\tau \sec \theta_2) \frac{d_0 - d(\theta_1)}{d(\theta_2) - d(\theta_1)} - \exp(-\tau \sec \theta_1) \frac{d_0 - d(\theta_2)}{d(\theta_2) - d(\theta_1)} \right]} \quad (4)$$

Для определения $T_{\text{ср}}$ были использованы углы $\theta_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 80^\circ$. Систему трансцендентных уравнений (2)–(4) решали методом последовательных приближений. На первом шаге $T_{\text{ср}}$ считалось

равным T_0 (изотермическое приближение). При решении системы уравнений (2)–(4) по выражению $\ln(k(T_{\text{ср}} - T_r))$ получаем k , а из (2) величину A , т.е.

каждый цикл измерений данным методом является и абсолютной калибровкой.

В [8] проанализированы ошибки измерений атмосферного поглощения методом разрезов по двум углам и опорной области [7] и сделан вывод, что относительная погрешность определения τ находится в пределах 10...20%. Для повышения точности измерений предлагаемым методом были проанализированы особенности его применения и требования к аппаратурному комплексу.

Ограничения плоскостистой модели атмосферы по зенитному углу возможны из-за эффектов, связанных с преломлением и поглощением в атмосфере.

Преломление в тропосфере. Приводит к искривлению траектории распространения радиоволн в сторону земной поверхности (нормальная рефракция). При зенитном угле $\theta < 85^\circ$ можно пренебречь рефракционными явлениями для длин волн до 1 мм [7].

Поглощение в тропосфере. В приближении плоскостистой модели атмосферы яркостная температура атмосферы описывается соотношением (1), в котором разделены переменные: T_{cp} не зависит от угла θ , а угловая зависимость определяется выражением в скобках. В работе [7, рис. 3] показана зависимость T_{cp}/T_0 от $\tau/\cos\theta$. Из графика видно, что $T_{cp}/T_0 \approx \text{const}$ при $\tau/\cos\theta < 2$ или $\theta < \arccos(\tau/2)$.

Ограничения плоскостистой модели атмосферы на диапазон углов визирования в методе разрезов для длин волн миллиметрового диапазона приведены в табл. 1. Для уменьшения величины ошибок определения поглощения необходимо использовать максимально возможный диапазон зенитных углов (для 3 мм углы от зенита до 80°). Метод позволяет использовать любое количество углов в указанных диапазонах.

Требования к диаграмме направленности антенны при использовании метода разрезов. Требуемая ширина диаграммы направленности антенны определяется так, чтобы разность между антенной температурой и яркостной температурой атмосферы на оси диаграммы не превышала флуктуационной

Таблица 1. Диапазон углов визирования в модифицированном методе разрезов

λ , мм	τ^* , Нп	θ , град
8	0.1	$\theta < \arccos(0.05) \approx 85^\circ$
3	0.3	$\theta < \arccos(0.15) \approx 80^\circ$
2	0.5	$\theta < \arccos(0.25) \approx 75^\circ$
1	0.9	$\theta < \arccos(0.45) \approx 63^\circ$

*Значения атмосферного поглощения каждого диапазона длин волн ориентировочные.

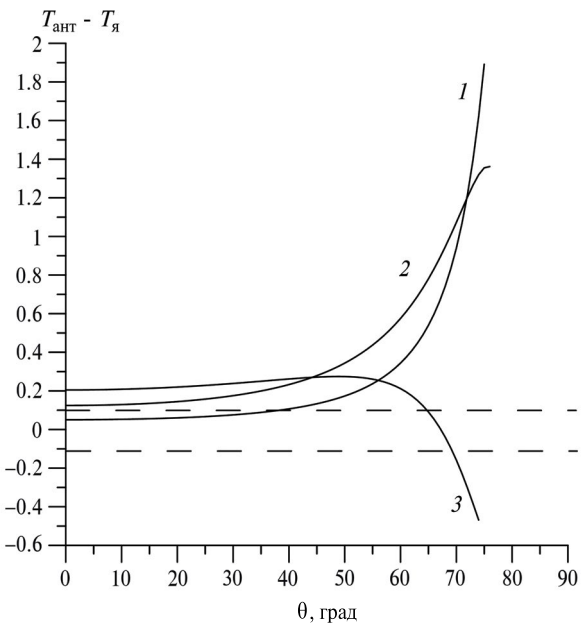


Рис. 1. Зависимости разности антенной и яркостной температур атмосферы от зенитного угла для диаграммы 7° и трех значений поглощения 0.1 (1), 0.3 (2) и 0.9 (3).

чувствительности радиометра, которая для приемников без охлаждения составляет $\sim 0.1...0.3$ К. Зависимости разности антенной температуры и яркостной на оси диаграммы вычислялись для диаграмм 7° , 3° и 1° и трех значений поглощения 0.1, 0.3 и 0.9, примерно соответствующих длинам волн 8, 3 и 1 мм (рис. 1). Допустимый диапазон значений ± 0.1 К. Видно, что в этом случае диаграмму 7° (см. рис. 1) можно использовать на 8 мм только до 40° от зенита, для других длин волн диаграмма 7° не может быть использована в методе разрезов. Расчеты показывают, что для флуктуационной чувствительности 0.3 К диаграмму 3° можно использовать на длине волны 3 мм до 80° от зенита, а диаграмму 1° — на любых углах без ограничений.

При определении атмосферного поглощения необходимо учитывать, что τ и T_{cp} взаимосвязанные величины и попытка вписывания экспоненты в результаты измерений угломестной зависимости излучения атмосферы вида (1) без учета средней температуры приводит к увеличению погрешности τ . Одновременное определение τ и T_{cp} является новым и важным достоинством предлагаемого метода.

Учет этих факторов реализован в нашей установке, в окне прозрачности 3 мм. Это позволило измерять величину атмосферного поглощения при ясной погоде или облачности до 2.5 баллов (без осадков) с ошибкой менее 1%.

Радиометрические методы зондирования атмосферы позволяют определять интегральное содержание водяного пара Q в столбе по собственному излучению атмосферы в линиях поглощения

водяного пара. Такие исследования проводятся, как правило, в микроволновой линии поглощения водяного пара $\nu = 22.23$ ГГц ($\lambda = 1.35$ см). Однако спектральная линия поглощения $\lambda = 1.35$ см является достаточно слабой для измерения малых содержаний водяного пара Q 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 70...110 ГГц ($\lambda \sim 3$ мм) в окне прозрачности между интенсивными линиями поглощения атмосферного кислорода, 60 и 120 ГГц. В силу указанных обстоятельств чувствительность к изменению содержания водяного пара Q на склоне линии 1.64 мм будет существенно выше, чем в традиционном диапазоне исследования H_2O в линии 1.35 см.

Для обращения задачи использовано регрессионное соотношение, связывающее полное поглощение с интегральным содержанием водяного пара Q и интегральным водосодержанием облаков W [10]:

$$\tau(\lambda) = \tau_{\text{O}_2}(\lambda) \exp\left[-(h - h_{\text{дл}})/h_{\text{к}}\right] + \bar{\varphi}_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)Q + \psi_W(\lambda, t_{\text{обл}})W. \quad (5)$$

В (5) экспоненциальный множитель у первой компоненты учитывает зависимость поглощения в кислороде от высоты места измерений, где $h_{\text{к}} = 5300$ м – эффективная длина пути по поглощению в кислороде [7,11], $h_{\text{дл}} = 180$ м – высота места калибровочных измерений над уровнем моря, h – высоты площадок над уровнем моря (для плато Суффа это 2335 м, для Карадага 105 м). Поглощение в кислороде $\tau_{\text{O}_2}(\lambda)$ и эффективные значения удельного коэффициента поглощения в водяном паре $\bar{\varphi}_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ могут рассчитываться заранее по квантово-механической теории поглощения в кислороде [12] и в водяном паре [13] для ясной атмосферы при $W = 0$. Как нам представляется, более достоверные значения $\tau_{\text{O}_2}(\lambda)$ и $\bar{\varphi}_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ могут быть получены по калибровочным измерениям радиометрических систем соответствующих диапазонов и зондовым измерениям. Для рабочей частоты радиометра $\nu = 94$ ГГц по калибровочным измерениям в г. Долгопрудный (Московская обл.) были получены значения $\tau_{\text{O}_2}(\lambda) = 0.045$, $\bar{\varphi}_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \approx 0.1076$ см²/г с Q в г/см². Удельное поглощение в капельной фракции облаков $\psi_W(\lambda, t_{\text{обл}})$ зависит от диэлектрической проницаемости воды, частотная зависимость которой имеет нерезонансный характер, и может быть вычислено из теории рассеяния Ми [6]. Величина $\psi_W(\lambda, t_{\text{обл}})$ зависит через диэлектрическую проницаемость воды от температуры облаков $t_{\text{обл}}$, в качестве которой использовалось $T_{\text{ср}}$.

Процедура измерения характеристик атмосферы включала одновременные измерения τ и $T_{\text{ср}}$.

Систему уравнений (2)–(4) решали методом последовательных приближений. Итерационный ряд продолжался до тех пор, пока изменение τ на текущем шаге не становилось меньше 1%. Измерение исключалось из рассмотрения, если число итераций было больше четырех. Получаемые данные также позволяют измерить величину толщины слоя водяных паров h_W , определяемой соотношением

$$h_W = \frac{Q}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}},$$

где $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ – приземное значение абсолютной влажности.

Основным недостатком метода разрезов является то, что он работает в приближении плоскостистой атмосферы, т.е. при ясной погоде, слабой или слоистой облачности. Получить поглощение в атмосфере в условиях разрывной облачности можно только при наличии абсолютной калибровки, используя измерения яркостной температуры неба $T_{\text{я}}$ в зените (1). Разделить вклад облаков и вклад безоблачной атмосферы в поглощение в окнах прозрачности можно, если измерять атмосферное поглощение на двух частотах, используя их разные частотные зависимости [8]. Для одновременного определения Q и W при использовании только одной частоты, был разработан одноволновый способ измерения интегрального влагосодержания и капельной фракции облаков при облачности до 2.5 баллов.

В модифицированном методе разрезов при облачности до 2.5 баллов отдельные облака могут попадать в диаграмму антенны в 25% случаев на некоторых углах. Поскольку метод наименьших квадратов в данной модификации метода вписывает оптимальную прямую между измеренными точками, отдельные отсчеты с попаданием облаков слабо влияют на получаемую величину поглощения и оно близко к поглощению ясной атмосферы.

При этом если в данный момент облако попало в диаграмму антенны в зените, то поглощение в зените τ_0 будет

$$\tau_0 = \tau + \tau_w, \quad (6)$$

где $\tau_w = \psi_W W$ – поглощение в облаке, τ – поглощение, полученное из разреза. В модифицированном методе разрезов находим также и абсолютную калибровку, которую можно использовать для определения τ_0 в зените.

По этой процедуре поглощение τ_0 будет равно

$$\tau_0 = \ln\left(k(T_{\text{ср}} - T_r)\right) - \ln\left|d_0 - d(\theta = 0) - k(T_0 - T_{\text{ср}} + T_r)\right|, \quad (7)$$

где $d(\theta = 0)$ – показания радиометра при антенне, направленной в зенит. Из (6) и (7) находим τ_w .

Способ был реализован на длине волны 3 мм в ходе годового цикла измерений. Была показана возможность обнаружения и определения водности облаков в зените в реальном масштабе времени при облачности до 2.5 баллов.

2. ГОДОВОЙ ХОД ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ПОЛИГОНЕ «КАРАДАГ»

В 2020–2021 гг. на полигоне «Карадаг» (НИРФИ ННГУ) проведен годовой цикл измерений атмосферного поглощения на длине волн 3 мм.

Для Суффы [5] интегральное содержание водяного пара получено не радиометрическим методом, а по данным зондовых измерений за 1981–1991 гг. Сравнение площадок желательно проводить по результатам измерений по единой методике и в близкие моменты времени. В [8] приводятся данные одновременных измерений интегрального влагосодержания по зондовым и радиометрическим данным в Ленинградской области. Коэффициент корреляции влагосодержаний, полученных этими методами, составил 0.86 при несплошной облачности (4...5 баллов). Поэтому в данном случае целесообразно использовать более старые зондовые данные для плато Суффа, так как более новые измерения атмосферного поглощения на плато Суффа на длинах волн 3 и 2 мм [14] противоречат друг другу [10]. Другим аргументом в пользу возможности сравнения наших годовых измерений с данными 1981–1991 гг. является их значительная временная продолжительность, что позволяет усреднить изменчивость погодных условий.

На рис. 2 приведены результаты измерений интегрального содержания водяного пара для плато Суффа (в мм осажженной влаги) согласно [5]. В радиоастрономии интегральное содержание водяного пара Q принято измерять в миллиметрах осажженной влаги, которая связана с Q в г/см², принятой в метеорологии, соотношением $Q(\text{мм}) = 10Q(\text{г/см}^2)$. Также на рис. 2 показано атмосферное поглощение в зените в диапазоне частот 92.5...96.4 ГГц, соответствующее представленным интегральным влагосодержаниям. Правая шкала на рис. 2 с поглощениями для длины волны 3 мм для плато Суффа дает представление о том, какие поглощения на длине волны 3 мм имели бы место в случае измерений. Необходимо отметить, что низкие влагосодержания для плато Суффа в зимний период могут не соответствовать действительности, так как в холодный период зондовые измерения дают заниженную величину влажности. При этом погрешность определения Q по данным радиозондирования составляет около 35% [8].

Кроме того, на рис. 2 представлены данные измерений атмосферного поглощения на длине волн 3 мм на полигоне «Карадаг» и полученные по ним интегральные влагосодержания. Данные ав-

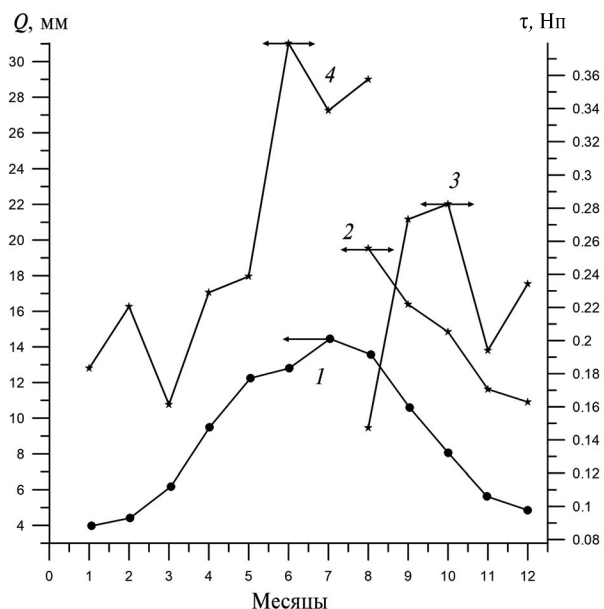


Рис. 2. Среднемесячные влагосодержания атмосферы Q при облачности менее 2.5 баллов для Суффы за 1981–1991 гг. (1), для полигона «Карадаг» с августа по декабрь 2019 г. [4] (2), с августа по декабрь 2020 г. (3), с января по август 2021 г. (4). Правая шкала — измерения атмосферного поглощения в диапазоне 3 мм для полигона «Карадаг» (2–4), левая шкала — интегральное влагосодержание для Суффы (1) и «Карадага» (2–4).

густа 2020 и 2021 гг. для полигона «Карадаг» иллюстрируют годовую изменчивость атмосферной ситуации. График подтверждает результаты сравнительного анализа этих площадок в [4]:

- 1) среднемесячные содержания водяного пара для полигона «Карадаг» на 5...7 мм осажженной влаги больше, чем для Суффы;
- 2) количество ясных суток на полигонах Суффа и Карадаг отличается несущественно; содержание водяного пара на Карадаге на 20...30% больше, чем на Суффе;
- 3) высота Карадага над уровнем моря (105 м) в 23 раза меньше, чем у Суффы (2335 м); использование в данном случае высокогорья, в рамках стандартного подхода для выбора мест установки антенн ММВ-диапазона, дает слабый эффект;
- 4) при одинаковых температурах примерно равны и интегральные влагосодержания; приземная температура является одним из основных факторов влияния на интегральное влагосодержание, в том числе в высокогорье;
- 5) низкие интегральные влагосодержания зимой для Суффы могут не соответствовать действительности, так как в холодный период зондовые измерения дают заниженную величину влажности.

Как указано в [4], средние летние температуры на плато Суффа из-за высокогорья соответствуют 14...16 °С, несмотря на то что рядом находится

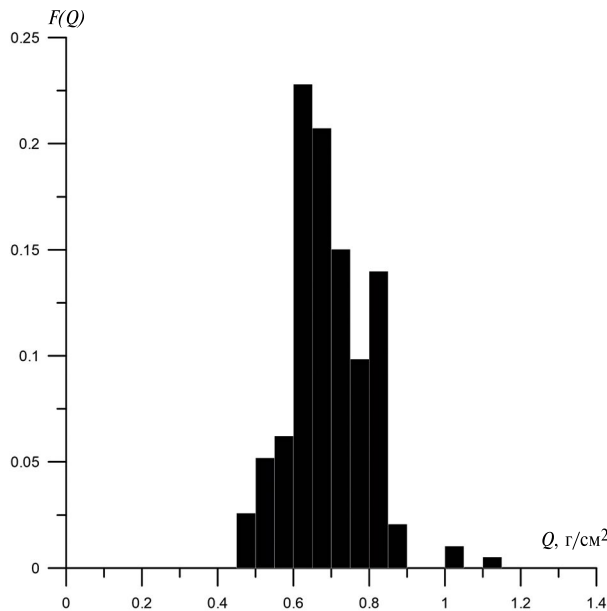


Рис. 3. Гистограмма распределения величин интегрального влагосодержания атмосферы Q (г/см²), полученная 7–8 марта 2021 на длине волны 3 мм.

Ферганская долина с высокими летними температурами. В зимний период приземные температуры на плато Суффа отрицательные, в отличие от Карадага, и основным фактором является вымораживание, а не высота над уровнем моря. Необходимо отметить, что в местах с холодным климатом обычно наблюдается и малое количество ясных дней.

О значениях влагосодержания атмосферы на полигоне «Карадаг» весной и летом 2021 г. Как видно из рис. 2, летом 2021 г. на полигоне «Карадаг» наблюдались значения интегрального влагосодержания, превышающие величины 2019 и 2020 гг. Эффект связан со значительной циклонической активностью в Крыму, которая наблюдалась летом 2021 г.

На рис. 3 приведена гистограмма распределения величин интегрального влагосодержания Q по измерениям на длине волны 3 мм 7–8 марта 2021. Видно, что она одногорбая, хотя и соответствует малым интегральным влагосодержаниям, т.е. этот механизм обезвоживания не связан с суточной сменой атмосферной циркуляции, обычно наблюдаемой в летние месяцы [1–4].

Предложенный одноволновый метод измерения поглощения в атмосфере в диапазоне ММВ позволяет при слабой облачности (до 2.5 баллов) разделить вклад атмосферной влаги и вклад капельной фракции облаков. В процессе измерений атмосферного поглощения, облачная ситуация определялась по данным ближайшей метеостанции. Сравнение метеоданных по облачности и данных радиометрического зондирования позволяют выявить их особенности.

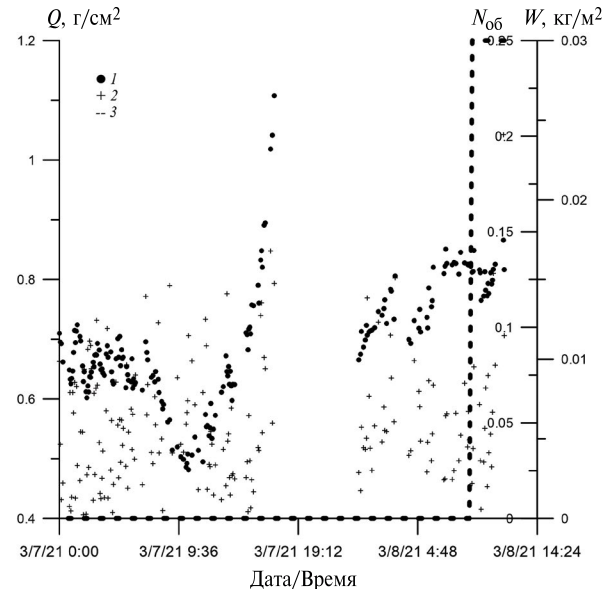


Рис. 4. Влагосодержание атмосферы Q (1), водозапас облаков W (2) по измерениям на длине волны 3 мм, и доля неба, покрытая облаками, по метеоданным $N_{об}$ (3), полученные 7–8 марта 2021.

На рис. 4 приводится временной ход влагосодержания атмосферы Q , водозапаса облаков W по измерениям на длине волны 3 мм и доля неба, покрытая облаками по метеоданным $N_{об}$. Видно, что несмотря на малые влагосодержания суточный ход не наблюдается. Также видно, что в тот же промежуток времени наблюдался и малый водозапас капельной фракции. Доля неба, покрытая облаками, получена из балльности облачности при делении на 10.

Как видно из рис. 4, наблюдается запаздывание изменений облачности по метеоданным по сравнению с измеренной капельной фракцией облаков.

Кроме того, из рисунка видно, что капельная фракция облаков носит разрывный характер. Это иллюстрирует преимущества радиометрической системы: наблюдения происходят в реальном масштабе времени с регистрацией численных характеристик облачности. Возможно, данная методика может быть использована и при облачности до 5 баллов [8], но это требует дополнительных исследований.

На рис. 5 показан временной ход приземной T_0 и средней $T_{ср}$ температур атмосферы по измерениям на длине волны 3 мм. Видно, что $T_{ср}$ имеет суточный ход и меняется вместе с приземной температурой. Приводимые данные демонстрируют преимущество методики определения $T_{ср}$ в реальном масштабе времени по сравнению с расчетами по моделям [7]. Также отметим, что в течение 7–8 марта 2021 $T_{ср}$ было больше T_0 , т.е. наблюдалась температурная инверсия. Напомним, что в стандартных условиях температура воздуха с высотой понижается, что должно приводить к тому, что $T_{ср} < T_0$.

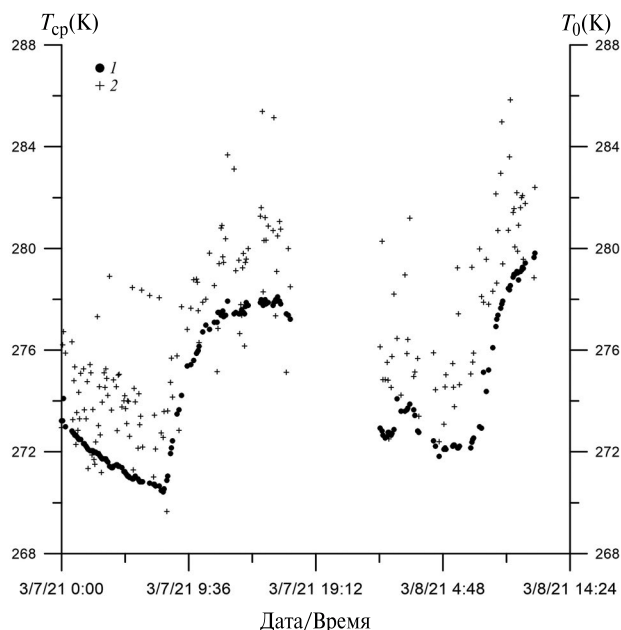


Рис. 5. Приземная T_0 (1) и средняя T_{cp} (2) температуры атмосферы по измерениям, проведенным 7–8 марта 2021, на длине волны 3 мм.

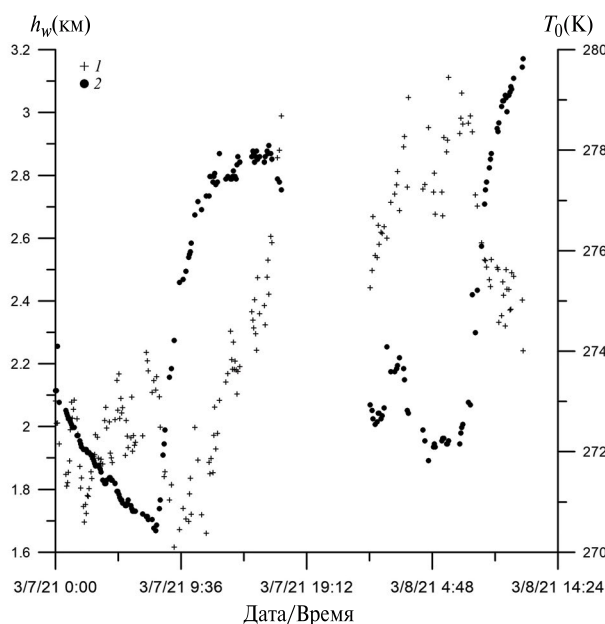


Рис. 6. Толщина слоя водяных паров h_w (1) и приземная температура атмосферы T_0 (2) по измерениям, проведенным 7–8 марта 2021, на длине волны 3 мм.

Интересен также временной ход толщины слоя водяных паров h_w в марте, представленный на рис. 6.

Суточный ход наблюдается, причем в дневное время толщина слоя водяных паров h_w уменьшается. Колебания величины h_w значительные и достигают километра. Разрывы в записях соответствуют ситуациям, когда облачность была более 2.5 баллов. Очевидно, что механизм формирования ситуации

с высокой прозрачностью атмосферы в миллиметровом диапазоне (малые величины интегрального влагосодержания) на полигоне «Карадаг» различны летом и весной. По-видимому, это связано с формированием температурной инверсии в атмосфере в весенний период в условиях антициклона, когда происходит солнечный прогрев суши, а море еще не прогрелось. Этот вопрос требует дальнейших исследований, особенно с включением в измерительную систему канала на длине волны 1 мм, что позволит повысить точность измерения параметров атмосферы в условиях малых величин интегрального влагосодержания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам годового цикла измерений атмосферного поглощения на длине волны 3 мм на полигоне «Карадаг» проведен сравнительный анализ значений интегрального влагосодержания, определяющих условия распространения ММВ: для Карадага и для Суффы. Измерения показывают, что количество ясных суток на полигонах Суффа и Карадаг отличается несущественно, а содержание водяного пара на Карадаге на 20...30% больше, чем на Суффе. Высота Карадага над уровнем моря (105 м) в 23 раза меньше, чем у Суффы (2335 м). В данном случае использование высокогорья в рамках стандартного подхода для выбора мест установки антенн ММВ-диапазона дает слабый эффект. На этих двух площадках при близких температурах наблюдаются сравнимые интегральные влагосодержания. Приводимые низкие интегральные влагосодержания зимой для Суффы могут не соответствовать действительности, так как в таких условиях погрешность зондовых измерений достигает 35%. Таким образом, по результатам натурных измерений, показана возможность использования полигона «Карадаг» для установки систем космической связи и измерений космических источников в диапазоне ММВ.

2. Разработан модифицированный метод разрезов, применение которого открывает новые возможности исследования:

- одновременно определяются две взаимосвязанные характеристики — τ и T_{cp} , а также Q , W и h_w ;

- атмосферное поглощение измеряется при ясной погоде или облачности до 2.5 баллов (без осадков) с ошибкой менее 1%;

- имеется важное отличие модифицированного метода разрезов от радиометрических систем, восстанавливающих высотные профили метеопараметров. В таких системах используются априорные статистические данные об измеряемых величинах, а качественное восстановление профилей возможно только вблизи мест зондовых измерений, на основе которых эти статистические данные получены. Для модифицированного метода разрезов

таких ограничений нет, и он может быть использован в любом месте без привязки к местам зондовых измерений.

3. Представлены данные измерений поглощения в атмосфере, средней температуры атмосферы, толщины слоя водяных паров, интегрального влагосодержания атмосферы и капельной фракции облаков весной 2021 г. на полигоне «Карадаг». Показано, что средняя температура атмосферы и толщина слоя водяных паров являются существенно переменными величинами.

4. Показано, что наблюдавшиеся на полигоне «Карадаг» в марте 2021 г. и в летний период 2020 г. низкие интегральные влагосодержания, 0.5...0.8 г/см² (5...8 мм осаждаемой влаги), имеют разные механизмы формирования. Возможной причиной может быть температурная инверсия, сформировавшаяся над полигоном «Карадаг» в марте 2021 г. и обнаруженная по данным радиометрического зондирования.

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны А. В. Троицкому (НИРФИ) за данные калибровочных измерений в г. Долгопрудный Московской обл.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты в рамках базовой части государственного задания ННГУ FSWR-2023-0038, ИФМ РАН 0030-2021-0024, а также ФИЦ ИнБЮМ 121040100327-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов М. И., Бубнов Г. М., Бубукин И. Т. и др. // *Астрофизический бюллетень*. 2018. Т. 73. № 3. С. 412.
2. Бубукин И. Т., Ракуть И. В., Агафонов М. И. и др. // *ЖЭТФ*. 2019. Т. 156. № 1. С. 43.
3. Бубукин И. Т., Агафонов М. И., Ракуть И. В. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2019. Т. 62. № 7–8. С. 630.
4. Бубукин И. Т., Ракуть И. В., Агафонов М. И. и др. // *Астрономический журн.* 2021. Т. 98. № 7. С. 581.
DOI: 10.31857/S0004629921080016.
5. <http://asc-lebedev.ru/index.php?dep=16&suffa=3>
6. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. *Радиоизлучение Земли как планеты*. М.: Наука, 1974.
7. Кисляков А. Г., Станкевич К. С. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1967. Т. 10. № 9–10. С. 1244.
8. Степаненко В. Д., Шукин Г. Г., Бобылев Л. П., Матросов С. Ю. *Радиотеплолокация в метеорологии*. Л.: Гидрометеиздат, 1987.
9. Бубукин И. Т., Станкевич К. С. // *Успехи совр. радиоэлектроники*. 2006. № 11. С. 39.
10. Бубукин И. Т., Ракуть И. В., Агафонов М. И. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2022. Т. 65. № 10. С. 791.
DOI: 10.52452/00213462_2022_65_10_791
11. Ulich B. L. // *Astrophys. Lett.* 1980. V. 21. P. 21.
12. Rasenkrans P. W. J. // *Qualitative Spectroscopy and Radiation Transfer*. 1988. V. 39. № 4. P. 287.
13. Катков В. Ю. // *РЭ*. 1997. Т. 42. № 12. С. 1441.
14. Bubnov G., Vdovin V. F., Zemlyanukha P. M. et al. // *EPJ Web of Conf.* 2018. V.195. Article No. 09002.

A MODIFIED TIPPING-CURVE METHOD IN THE COMPARATIVE STUDY OF SITES FOR SPACE COMMUNICATIONS AND RADIO ASTRONOMY SYSTEMS IN THE MILLIMETER WAVELENGTH RANGE

**I. T. Bubukin^{a, *}, I. V. Rakut^{a, b}, M. I. Agafonov^{a, b}, A. L. Pankratov^{a, b, c}, T. Y. Gorbunova^d,
R. V. Gorbunov^d, V. I. Bubukin^b**

^a*Radiophysical Research Institute, N. I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Bol'shaya Pecherskaya Str., 25/12, Nizhny Novgorod, 603950 Russian Federation*

^b*Nizhny Novgorod State Technical University name after R. E. Alekseev,
Minina Str., 24, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

^c*Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences,
Academicheskaya Str., 7, Nizhny Novgorod, 603087 Russian Federation*

^d*Institute for Biology of the South Seas n.a. A. O. Kovalevsky, Russian Academy of Sciences,
Nakhimov Ave., 2, Sevastopol, 299011 Russian Federation*

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

Received October 28, 2023 Revised May 19, 2024 Accepted May 25, 2024

Measurements of atmospheric absorption in transparency windows in the range of millimeter waves (MMW) have been carried out. A modification tipping-curve method is proposed that allows measuring atmospheric absorption, the average temperature of the atmosphere and separating the contributions of atmospheric moisture and the droplet fraction of clouds by single-wave measurements in the MMV range with clouds up to 2.5 points (without precipitation). The possibility of detecting and determining the water content of clouds at the zenith in real time is shown. The annual course of atmospheric moisture content and atmospheric absorption at a wavelength of 3 mm (2019 and 2020–2021) for the Karadag landfill. The previously obtained results of a comparative analysis of the Karadag landfill and the Suffa plateau are confirmed. The possibility of using the Karadag landfill for the installation of space communication systems and measurements of space sources in the MMV range is shown.

Keywords: weather, climate, atmospheric radiation, remote sensing, moisture content, millimeter waves, space communication