

УДК 53.06+53.043

СОГЛАСОВАННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ АТМОСФЕРЫ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОМЕТРОВ

Г. М. Бубнов^{1,2*}, В. Ф. Григорьев³, И. И. Зинченко¹, П. М. Землянуха¹, Г. Н. Ильин⁴,
Д. М. Кабанов⁵, В. И. Носов¹, В. Ф. Вдовин^{1,2}

¹ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

² Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород;

³ Полярный геофизический институт, г. Апатиты;

⁴ Институт прикладной астрономии РАН, г. Санкт-Петербург;

⁵ Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

В работе предложена и практически реализована методика нахождения эквивалентных частот, которые приписываются оптическим толщинам атмосферы, измеряемым двухканальной широкополосной радиометрической системой в миллиметровом диапазоне длин волн. Установление эквивалентной (среднезвешенной по амплитудно-частотной характеристике системы) частоты в соответствующем окне прозрачности атмосферы даёт возможность связать широкополосные измерения оптической толщины с узкополосными радиометрическими измерениями, применяемыми в стандартных расчётах интегральной влажности. Поиск эквивалентных частот проводится на основе сопоставления экспериментальных данных об эффективной прозрачности атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн и об интегральной влажности с использованием моделирования реальной атмосферы при помощи модели MPM Liebe. Разработанный метод согласованного определения влажности и прозрачности атмосферы в миллиметровом диапазоне может применяться как в радиоастрономических наблюдениях, так и для создания беспроводных телекоммуникационных каналов с большой производительностью. В частности, он позволяет конкретизировать спектральные характеристики измеряемой прозрачности атмосферы для исследуемой радиоастрономической площадки и оценить астроклиматические условия на ней.

ВВЕДЕНИЕ

При выборе места размещения радиоастрономической обсерватории проводится исследование астроклимата [1] с целью определения количества ясных дней, пригодных для наблюдений в соответствующем диапазоне радиочастотного спектра. Хотя необходимые метеопараметры атмосферы в настоящее время можно получить при помощи радиозондов [2], наиболее удобным и прямым способом оценки прозрачности атмосферы являются радиометрические измерения в тех окнах прозрачности, в которых будет функционировать будущая обсерватория. Точность радиометрических измерений зависит, в том числе, от качества их калибровки, которая усложняется по мере продвижения радиометрических систем в высокочастотную область к терагерцовому диапазону.

Калибровка¹ микроволновых узкополосных радиометрических систем обычно проводится в лабораторных условиях с использованием планковского излучения термостабилизированного чёрнотельного эталона, причём в общем случае для определения радиояркостной температуры излучения атмосферы [3] требуются две калибровочные точки: «холодная нагрузка» и «тёплая

* bubnov@ieee.org

¹ Здесь и в далее термин «калибровка» подразумевает получение достоверных данных на основе использования признанных методов и подходов и не касается формальных вопросов метрологической аттестации оборудования и предлагаемой методики измерений.

нагрузка». По измеренным значениям радиояркостной температуры рассчитывается интегральный коэффициент поглощения узкополосного радиосигнала — оптическая толщина [4].

Вместе с тем, свойства атмосферы позволяют определить оптическую толщину методом атмосферных разрезов, использующем лишь одну калибровочную точку с известной радиояркостной температурой. При этом измеряется приращение выходного сигнала радиометра, вызванное излучением атмосферы, относительно этой заведомо известной калибровочной точки [5]. Опорными сигналами обычно являются так называемые чёрнотельные эталоны, температура которых стабилизирована и/или хорошо известна.

Измерения оптической толщины могут быть выполнены относительно широкополосными радиометрами, неизбежно осуществляющими операцию определённого усреднения по частоте. Поскольку форма амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) приёмной системы радиометра существенно отличается от идеальной, то существует проблема неопределённости эквивалентных частот, приписываемых измеренным эффективным оптическим толщинам. Эквивалентная частота соответствует средневзвешенной по всей АЧХ приёмника частоте, т. е. это та частота, на которой наблюдался бы тот же уровень интегрального ослабления монохроматического сигнала, который наблюдается в среднем по всей полосе частот приёма радиометра. Средневзвешенную частоту можно получить путём усреднения реальной АЧХ приёмника, однако измерение реальной АЧХ в миллиметровом диапазоне является технически сложной задачей. В отличие от метода расчёта средневзвешенной частоты, предлагаемый нами метод сравнительно прост в реализации, но при этом тоже позволяет существенно сократить неопределённость в знании эквивалентных частот, а следовательно, уменьшить ошибки при пересчёте значений эквивалентной оптической толщины в интегральную влажность.

Отметим, что начальная цель настоящих исследований состояла в поиске взаимозависимости эффективной оптической толщины, получаемой с помощью радиометрического комплекса МИАП-2 [6], и интегральной влажности атмосферы, определяемой метеорологически или с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [7], а также в нахождении коэффициентов, связывающих данные параметры. В результате эксперимента обнаружилось несоответствие найденных коэффициентов удельного поглощения известным ранее для средних частот широкополосных приёмников МИАП-2. Как следствие, была предложена разрабатываемая в статье идея оценки эквивалентной частоты, получаемой из условия соответствия экспериментальных и расчётных коэффициентов удельного поглощения. В итоге предложенный подход позволил связать эквивалентную оптическую толщину и интегральную влажность на основе оригинальных результатов измерений, выполненных по методу атмосферных разрезов [4, с. 416, 8] широкополосными радиометрами МИАП-2, работающими в окнах прозрачности около 2 и 3 мм. Разработанная методика оценки эквивалентных частот радиометров в этих окнах и соответствующих коэффициентов удельного поглощения паров воды и кислорода может быть использована для других, более высокочастотных окон прозрачности атмосферы или для иных радиометрических систем.

1. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОМЕТРОВ В СОСТАВЕ КОМПЛЕКСА МИАП-2

Измерения эффективной оптической толщины атмосферы с помощью комплекса МИАП-2 проводятся двумя относительно широкополосными радиометрическими приёмниками, работающими в модуляционном режиме по методу атмосферных разрезов. Полосы приёма перекрывают заметную часть окон прозрачности атмосферы, что особенно важно для решения широкополосных задач радиоастрономии и телекоммуникации в субтерагерцовом диапазоне. В этом комплексе также предусмотрен режим абсолютного измерения яркостной температуры при фиксированном

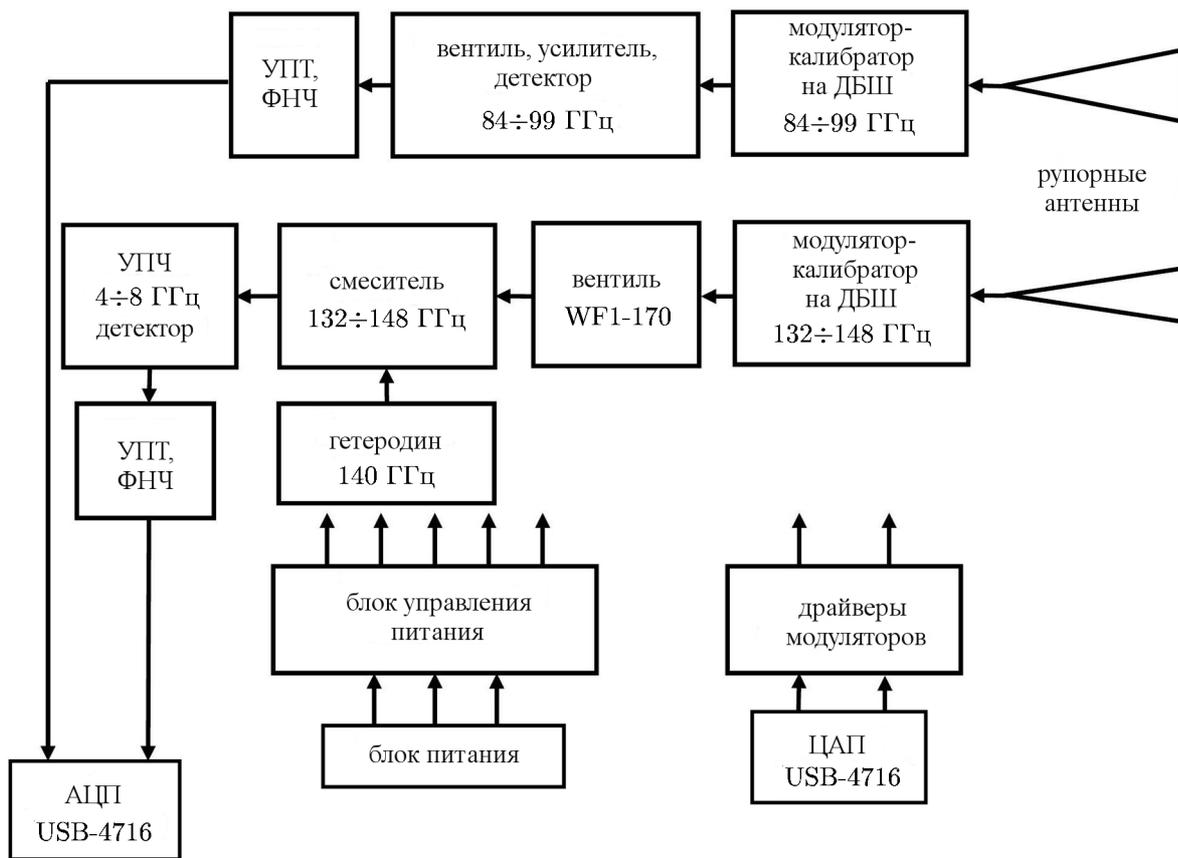


Рис. 1. Функциональная схема блока приемников МИАП-2

угле, однако эти измерения в настоящее время недоступны по техническим причинам.

Комплекс МИАП-2 представляет собой радиометрическую систему, включающую в себя два радиометра, размещённых в общем корпусе и работающих в диапазонах частот 84÷99 ГГц (3 мм) и 132÷148 ГГц (2 мм)², опорно-поворотное устройство и систему управления, сбора и обработки данных на основе персонального компьютера и модуля USB-4716 фирмы Advantech с цифро-аналоговым (ЦАП) и аналого-цифровым (АЦП) преобразователем и цифровыми входами и выходами. Оба радиометра оснащены линзовыми антеннами с коническим облучателем. Линзы изготовлены из фторопласта, диаметры их апертур составляют 100 и 65 мм, а фокусные расстояния — 178,5 и 115,5 мм для каналов 3 и 2 мм соответственно. Ширина диаграммы направленности антенн (с линзой) по половинному уровню мощности в обоих диапазонах равняется примерно 2,5°.

Функциональная схема блока радиометров приведена на рис. 1. Радиометр диапазона 3 мм состоит из приёмника прямого усиления с детектированием на основной частоте и модулятора-калибратора на входе. Шумовая температура приёмника составляет примерно 1 300 К. Конструктивно он выполнен в виде неразборного моноблока. Твёрдотельный приёмник радиометра диапазона 2 мм изготовлен по супергетеродинной схеме и собран из дискретных компонентов, к которым относятся гетеродин на диоде Ганна со встроенным удвоителем частоты, балансный смеситель на диодах с барьером Шоттки (ДБШ), усилитель промежуточной частоты (УПЧ) и квадратичный детектор сигнала промежуточной частоты с диапазоном 4÷8 ГГц. Шумовая температура

² Указаны паспортные значения приёмных компонентов по отдельности. Ниже эти значения будут пересмотрены.

радиометра с учётом вклада вентиля и антенного тракта составляет примерно 5 800 К. Как показала практика, аппаратура с модулятором-калибратором миллиметрового диапазона на основе встречно-штыревых ДБШ на входе приёмного устройства радиометра [9] требует регулярной калибровки, а получаемые значения эффективной оптической толщины зависят от температуры окружающей среды.

Хорошо известны три основных метода определения прозрачности атмосферы: метод Бугера, метод абсолютных измерений радиояркостных температур излучения атмосферы и метод атмосферных разрезов [5]. Первый из них требует точного наведения на внеземной объект и годится только для безоблачной погоды. Наиболее независимый от погодных условий метод абсолютных измерений нуждается весьма сложной технической реализации: холодный чёрнотельный эталон радиояркостной температуры должен охлаждаться жидким азотом или термостатироваться элементами Пельтье, а переключение между нагрузками, как правило, должно осуществляться механическим квазиоптическим модулятором. Это весьма затруднительно реализовать для прибора, работающего в условиях экспедиции, при механических вибрациях и в неблагоприятных погодных условиях. Метод атмосферных разрезов является одним из наиболее надёжных и сравнительно просто реализуемых способов определения оптической толщины, что особенно важно для измерений в труднодоступных местах и экспедиционных условиях. Измерительный комплекс МИАП-2 реализует метод атмосферных разрезов на 6 зенитных углах: 0° , $60,5^\circ$, $76,3^\circ$, $81,4^\circ$, $84,2^\circ$, $88,6^\circ$, останавливаясь на 20 с для накопления сигнала на каждом из углов (сферичность атмосферы не учитывается). Время снятия одного разреза составляет около 3 мин, а интервал между циклами измерений — 10 мин. Разумеется, приведённые параметры могут быть изменены при запуске измерений. Известны некоторые недостатки метода атмосферных разрезов, связанные с измерениями облачности: прежде всего, погрешность измерений резко увеличивается из-за несоответствия облачной атмосферы её плоскостной модели, заложенной в метод. В нашей группе был разработан алгоритм обработки данных, позволяющий частично избавиться от этих недостатков [10], и зарегистрирована реализующая его программа [11]. В результате надёжность проводимых измерений не вызывает сомнений.

Оба радиометра в МИАП-2 являются к относительно широкополосными приборами, что повышает их чувствительность. Очевидно, АЧХ обоих приёмников не может быть прямоугольной, а ограничение полосы приёма паспортными данными и определение согласно им значения частоты принимаемых сигналов является чисто условным ($84\div 99$ ГГц и $132\div 148$ ГГц). Подобный эффект проявился, в частности, в наблюдениях с помощью приёмника диапазона 3 мм, установленного в обсерватории «Суффа»: его полоса приёма оказалась ограничена со стороны нижних частот только сечением волновода. Проблема подавления излучения интенсивной полосы кислорода с центральной частотой 60 ГГц была частично решена установкой волноводного заградительного фильтра [12].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЗАИМОЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ И ИНТЕГРАЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРЫ

Идея предлагаемой методики поиска эквивалентных частот сводится к одновременным измерениям параметров атмосферы радиометром МИАП-2 и хорошо калиброванным метеоприбором для измерения интегральной влажности. Поглощение электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в атмосфере определяется, в основном, содержанием кислорода,

паров воды и водозапасаем облаков [13, 14]:

$$\tau(f, h, \text{PWV}, Q) = \alpha(f) \exp(-h/h_0) + \beta(f)\text{PWV} + \gamma(f)Q. \quad (1)$$

Здесь τ [Нп] — наблюдаемая оптическая толщина, h [км] — высота над уровнем моря, $h_0 = 5,3$ км — характеристическая высота кислорода, PWV [мм] — количество осаждаемой воды (Precipitable Water Vapor), Q [кг/м²] — водозапас облаков, α [Нп] — кислородная (сухая) часть поглощения на уровне моря, β [Нп/мм] — удельное поглощение в парах воды, γ [Нп · м²/кг] — удельное поглощение в облачности, f [ГГц] — частота.

Применительно к комплексу МИАП-2 остаётся открытым вопрос определения эквивалентных частот f , к которым следует отнести измеряемые оптические толщины. Эквивалентные частоты необходимы для определения значений частотно-зависимых коэффициентов α , β и γ , которые также меняются в зависимости от сезона и погодных условий.

Одно из первых обобщений экспериментальных данных об атмосферном затухании квазимонохроматического сигнала в миллиметровом диапазоне длин волн было представлено в 1980 году [13]. В ходе исследований астроклимата на Северном Кавказе в 2014 году мы провели численный расчёт на основе модели MPM Liebe [14] с использованием реального профиля атмосферы (температуры, давления, влажности), результат которого не совпал со значениями указанных коэффициентов, приведёнными в [13] (взятыми для средних частот приёмников радиометра).

В данном исследовании мы попытались выявить значения эквивалентных частот и соответствующих коэффициентов α , β и γ в натурном эксперименте, расположив два прибора (радиометрический и метеорологический) в одном месте и сравнивая получаемые с них данные. Эти натурные эксперименты, сопровождаемые рутинными измерениями астроклимата, проходили на двух площадках: на территории обсерватории «Бадары» (840 м над уровнем моря, Тункинская долина, Бурятия, 2016–2017 годы) и на архипелаге Шпицберген возле г. Баренцбург (36 м над уровнем моря, Арктика, 2018–2019 годы). Выбор площадок обусловлен задачей поиска хорошего астроклимата и наличием на площадках инструментов, определяющих интегральную влажность. Анализ астроклимата площадок изложен в наших работах [15, 16].

Источниками метеорологических данных об интегральной влажности в Бадарах были радиометр водяного пара (РВП) [17] и приёмник сигналов ГНСС [18]. Перечисленные приборы имеют хорошую точность определения количества осаждаемой воды, и их данные могут быть использованы в качестве опорного ряда по PWV , хорошо соответствующего измерениям радиозондов [19, 20]. Принцип работы РВП схож с принципом работы комплекса МИАП-2: он также находит значение оптической толщины по собственному излучению атмосферы и по определённым моделям рассчитывает интегральную влажность [21]. По сигналам ГНСС определялась тропосферная задержка распространения радиосигнала, которая, как известно, однозначно связана с интегральным влагосодержанием. Значения интегральной влажности по РВП и сигналам ГНСС практически совпадают, поэтому для наших расчётов нет разницы, с помощью какого инструмента они были получены. Одновременно с РВП и приёмником ГНСС радиометр МИАП-2 измерял оптическую толщину в окнах прозрачности 2 и 3 мм. Все данные синхронизованы по времени и интервалу измерений, для каждого диапазона мы можем построить облако значений и определить параметры линии регрессии при условии, что $Q = 0$ (т. е., выбирая для обработки только безоблачные промежутки времени). На рис. 2 точками представлены выборки данных по нескольким дням с безоблачной погодой в разные месяцы (январь — голубые точки, май — жёлтые, июнь — зелёные). Они отражают зависимость оптической толщины, измеренной МИАП-2 в окнах прозрачности 3 и 2 мм, от PWV , измеренной с помощью ГНСС-приёмника.

Второй аналогичный эксперимент был проведён возле г. Баренцбург на архипелаге Шпицберген [16] (красные кресты на рис. 2). В нём метеорологические значения PWV предоставлены

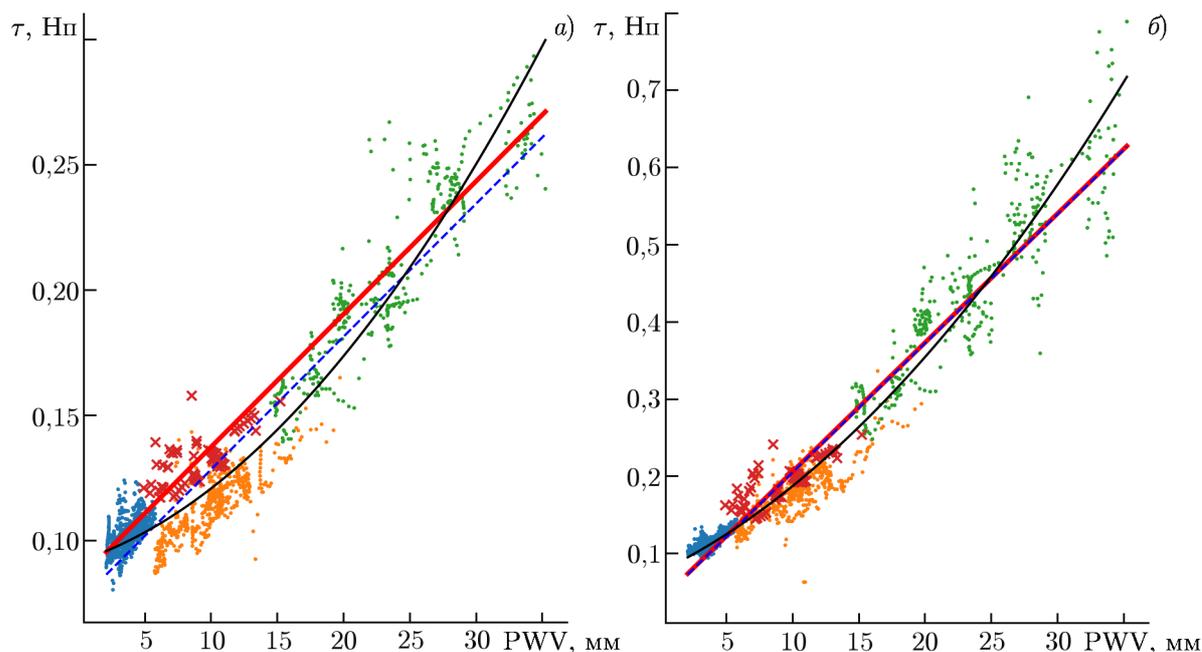


Рис. 2. Экспериментальная взаимосвязь эффективной оптической толщины τ в миллиметровом диапазоне и количества осаждаемой воды PWV в канале 3 мм (а) и 2 мм (б). Точками представлены результаты эксперимента на обсерватории «Бадары» (январь — голубые, май — жёлтые, июнь — зелёные); крестами — результаты эксперимента на Шпицбергене. Красная сплошная линия соответствует линейной регрессии эксперимента на Шпицбергене, синяя штриховая — линейной регрессии эксперимента в Бадарах (параметры указаны в табл. 1). Чёрная сплошная линия отвечает аппроксимации квадратичной зависимостью

томским Институтом оптики атмосферы им. В. Е. Зуева и получены при помощи спектрофотометра [22]. Фотометр, работающий по методу Бугера, наряду с аэрозольной оптической толщиной, измеряет интегральную атмосферную влажность по линии поглощения воды в диапазоне около 0,94 мкм. Измерения спектрофотометром проводятся нерегулярно, только в условиях, когда Солнце не перекрыто облаками и только в полярный день [23, 24]. С одной стороны, относительно малая выборка данных спектрофотометра не позволяет построить отдельную линию регрессии, с другой стороны выборка данных оказывается хорошо привязанной к ясной погоде, поскольку метод Бугера подразумевает данное условие. Все инструменты, с помощью которых определяется интегральная влажность в данном эксперименте (РВП, приёмник ГНСС и спектрофотометр), откалиброваны по интегральной влажности с данными метеозондирования [19–21].

Важно отметить, что результаты двух экспериментов оказались инвариантны по отношению к методу измерений PWV в пределах точности ошибки измерений оптической толщины (менее 10%). Линии регрессии отражают следующую связь между эффективной оптической толщиной (измеренным поглощением) и PWV для каждого окна прозрачности:

$$\tau_{\text{reg}}(\beta, b, \text{PWV}) = \beta \text{PWV} + b. \quad (2)$$

Регрессионный анализ наблюдений в Бадарах и на Шпицбергене представлен двумя разными зависимостями, т. к. обсерватории находятся на разных высотах, что предполагает разную величину «сухого» поглощения. Поэтому коэффициент β , отвечающий за поглощение в парах воды, определялся путём усреднения всех данных, а слагаемое b , отвечающее за «сухое» поглощение, варьировалось в зависимости от высоты точки наблюдения. Для определения параметров линий регрессии использовалось два метода: поиск линейной зависимости методом Тейла—Сэна [25] из

Таблица 1. Параметры линий регрессии

Параметр	канал 2 мм	канал 3 мм
β , Нп/мм	$0,0167 \pm 0,0017$ (9,9 %)	$0,0053 \pm 0,00067$ (12,7 %)
b_1 Нп	$0,038 \pm 0,003$ (8 %)	$0,075 \pm 0,001$ (1,3 %)
b_2 Нп	$0,039 \pm 0,003$ (8 %)	$0,084 \pm 0,001$ (1,3 %)
характеристики параболы	$(2,8 \cdot 10^{-4})x^2 + (8,2 \cdot 10^{-3})x + 0,077$	$(1,2 \cdot 10^{-4})x^2 + (1,7 \cdot 10^{-3})x + 0,091$

Таблица 2. Коэффициенты удельного поглощения (значение α приведено на уровне моря) в окнах прозрачности для длин волн в окрестности 3 и 2 мм

Параметр	канал 2 мм	канал 3 мм
α , Нп	$0,042 \pm 0,003$ (8 %)	$0,086 \pm 0,001$ (1,3 %)
β , Нп/мм	$0,0167 \pm 0,0017$ (9,9 %)	$0,0053 \pm 0,00067$ (12,7 %)

библиотеки `scikit-learn` [26] и поиск квадратичной зависимости методом наименьших квадратов при помощи программы `limfit` [27]. Квадратичная зависимость на рис. 2 просматривается визуально и математически: усреднённая ошибка при вписывании прямой на 35 % (2 мм) и на 52 % (3 мм) больше, чем для параболы. Для существования квадратичной зависимости имеются физические основания: с одной стороны, зимой интегральное поглощение обычно меньше; с другой стороны, удельное поглощение в кислороде увеличивается с понижением температуры. Поэтому в точках, полученных в холодный (зимний) период сезона, возрастает доля «сухого» поглощения по сравнению с тёплым (летним) сезоном. Указанный эффект качественно определяет наличие квадратичного изгиба, но количественные оценки его физических принципов на данном этапе работы не проводились. Результаты вычисления параметров линий регрессии представлены в табл. 1 (в скобках указаны погрешности).

Стоит отметить, что параметры линии регрессии практически не изменяются с добавлением новых данных со Шпицбергена относительно эксперимента в Бадахах. В уравнении (2) слагаемое b можно привести к «сухой» (или «кислородной») части поглощения, в литературе чаще обозначаемой α [13]. Первый член в (1) отражает его зависимость от высоты места. Приведённое к уровню моря значение α для разных площадок наблюдения получается примерно одинаковым (в пределах ошибки измерений). Таким образом, мы можем выразить общее эффективное поглощение в миллиметровом диапазоне в соответствии с формулой (1); значения коэффициентов, полученные из параметров линий регрессии, представлены в табл. 2. Оценка значений коэффициента γ , отвечающего за поглощение и рассеяние в облаках, на данном этапе исследований не проводилась.

Полученные значения коэффициентов имеют частный характер, т. е. относятся к конкретному прибору радиометра; тем не менее, методика определения коэффициентов без труда может быть использована для любого технического исполнения измерительных радиометров. В зависимости от ширины полосы приёма радиометра и формы его АЧХ значения коэффициентов будут варьироваться. Можно предположить, что они будут также зависеть от локальных особенностей исследуемой атмосферы, но на данном этапе работы этот вопрос не изучался.

Дополнительно была построена регрессия между данными эффективной оптической толщины по двум каналам радиометра с целью убедиться в отсутствии систематических ошибок в работе аппаратуры. В целом, полученная регрессия близка к линейной, а стохастические выбросы наблюдаются лишь в области больших поглощений, т. е. в условиях высокой влажности в атмосфере и возможного наличия разрывной облачности (рис. 3).

3. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ ПО МОДЕЛИ MPM LIEBE

Для оценки эквивалентных частот радиометров, проводимой в следующем разделе, воспользуемся известной моделью поглощения волн в атмосфере MPM Liebe [28]. Первичные данные для неё частично получены на резонаторном спектрометре, разработанном в ИПФ РАН [29]. Модель MPM Liebe позволяет рассчитать поглощение радиосигнала в атмосфере на любой частоте (в пределах от 10 до 1 000 ГГц) при стационарных условиях. В результате её работы определяются отдельно «сухая» и «влажная» части погонного поглощения:

$$\begin{aligned} \text{Abs}(f, P, H, T) = \\ = \text{Abs}_{\text{O}_2}(f, P, T) + \text{Abs}_{\text{H}_2\text{O}}(f, P, H, T), \quad (3) \end{aligned}$$

Здесь $\text{Abs}[\text{Нп/км}]$ — общее погонное поглощение, $\text{Abs}_{\text{O}_2}[\text{Нп/км}]$ — погонное поглощение в кислороде, $\text{Abs}_{\text{H}_2\text{O}}[\text{Нп/км}]$ — погонное поглощение в парах воды, $f[\text{ГГц}]$ — частота, $P[\text{мБар}]$ — давление, $H[\text{г/м}^3]$ — абсолютная влажность, $T[\text{К}]$ — температура.

В модель загружаются реальные данные о высотных профилях давления $P(h)$, температуры $T(h)$ и влажности $H(h)$ атмосферы, полученные метеозондированием [2]. В результате интегрирования составляющих уравнения (3) по высоте находится интегральное поглощение при реальных условиях $\tau_{\Sigma}(f) = \tau_{\text{O}_2}(f) + \tau_{\text{H}_2\text{O}}(f)$, где

$$\begin{aligned} \tau_{\text{O}_2}(f) &= \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} \text{Abs}_{\text{O}_2}[f, P(h), T(h)] dh; \\ \tau_{\text{H}_2\text{O}}(f) &= \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} \text{Abs}_{\text{H}_2\text{O}}[f, P(h), H(h), T(h)] dh, \quad (4) \end{aligned}$$

Количество осаждаемой воды вычисляется путём интегрирования абсолютной влажности во всём диапазоне высот. Коэффициенты α и β уравнения (1) из интегрального поглощения на любой высоте точки наблюдения h получаются следующим образом:

$$\alpha(f) = \frac{\tau_{\text{O}_2}(f)}{\exp(-h/h_0)}, \quad \beta(f) = \frac{\tau_{\text{H}_2\text{O}}(f)}{\int H(h) dh}. \quad (5)$$

4. ОЦЕНКА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЧАСТОТ РАДИОМЕТРОВ

По результатам, представленным в двух предыдущих разделах, мы имеем набор экспериментальных данных о коэффициентах α и β для окон прозрачности в окрестностях 2 и 3 мм (см.

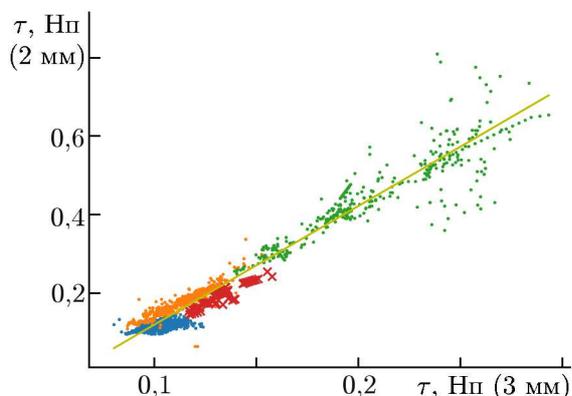


Рис. 3. Взаимозависимость эффективных оптических толщин в каналах 2 и 3 мм. Точками представлены результаты эксперимента на обсерватории «Бадары» (январь — голубые, май — жёлтые, июнь — зелёные); крестами — результаты эксперимента на Шпицбергене. Прямая линия соответствует зависимости $y = 3,03x - 0,18$

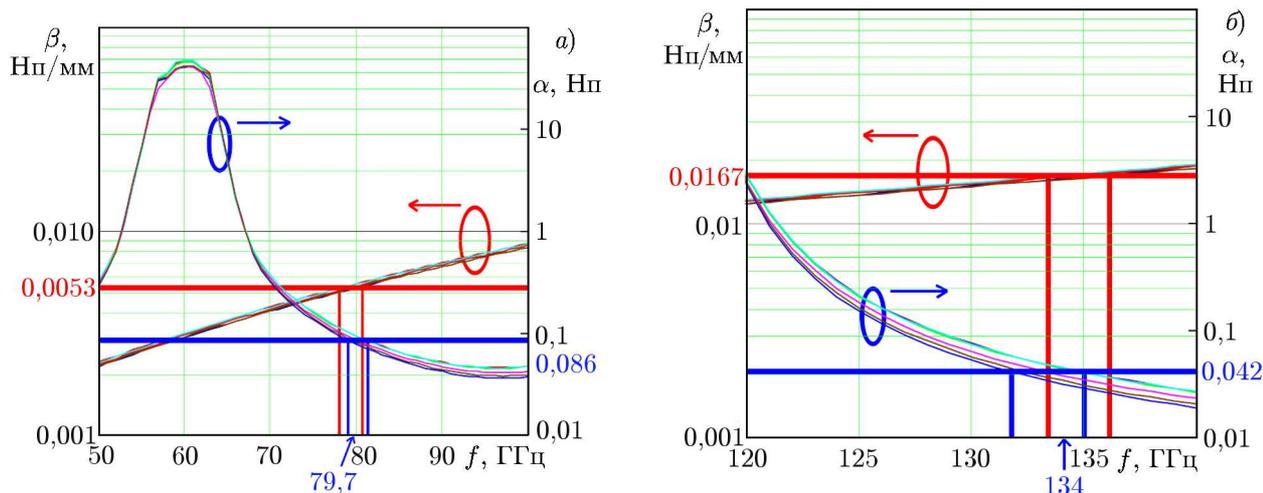


Рис. 4. Оценка эквивалентных частот по совпадению коэффициентов удельного поглощения для длин волн в окрестности 3 мм (а) и 2 мм (б). Линии, отмеченные синими окружностями, соответствуют коэффициенту α , красными — коэффициенту β

табл. 2), с одной стороны, и частотные зависимости ещё не усреднённых по частоте этих коэффициентов, рассчитанные согласно модели MPM Liebe, — с другой. Для получения значений эквивалентных частот, по нашему определению, следует подобрать частоту f в уравнениях (5) таким образом, чтобы расчётные и экспериментальные данные совпали. Рис. 4 наглядно демонстрирует принцип поиска эквивалентной частоты. Тонкими линиями представлены коэффициенты удельного поглощения, рассчитанные в зависимости от частоты для разных времён года по реальной атмосфере на тех площадках, на которых проводились наблюдения. Толстыми горизонтальными линиями отмечены значения усреднённых в окнах прозрачности коэффициентов, полученные из эксперимента по измерению эффективной оптической толщины широкополосным приёмником.

Было рассмотрено 6 различных профилей атмосферы по данным метеозондирования на станциях вблизи Шпицбергена и обсерватории «Бадары» (по одному за зимний и летний сезоны), а также в межсезонье. В результате оказалось, что эффективная частота варьируется в небольших пределах: $79 \div 81$ ГГц для длин волн в окрестности 3 мм и $133,5 \div 135,0$ ГГц для длин волн в окрестности 2 мм. В среднем для указанных и ряда других расчётов оценка эквивалентных частот эффективной оптической толщины для данных диапазонов составляет 79,7 и 134 ГГц.

Проведённая оценка эквивалентных частот не совпадает с паспортными (средними) значениями рабочих частот приёмников радиометра 91,5 и 140 ГГц соответственно (что отчасти связано с их формально техническим определением). Для приёмника диапазона 3 мм, работающего по схеме прямого усиления, несовпадение можно объяснить слабой избирательностью высокочастотного входного тракта, т. е. его избыточно широкой полосой, захватывающей часть интенсивной полосы кислорода на 60 ГГц. Установка волноводного фильтра могла бы решить эту проблему, но приводит к ухудшению чувствительности радиометрического блока. Приёмник диапазона 2 мм собран по супергетеродинной схеме со смесителем и вентилем на входе, и указанное несовпадение измеренной эквивалентной и средней рабочей частоты можно объяснить приёмом на удвоенной частоте гетеродина, поскольку никаких специальных схем подавления сигнала на последней не предусмотрено. Перечисленные технические факторы снижают качество получаемых данных, однако, при должной оценке их влияния, не уменьшают значимости измерений. Кроме того, эти измерения являются легко доступными по сравнению с измерениями другими, более точными приборами, например с использованием метеозондов [2]. Радиометрические измерения

лучше учитывают особенности локального климата местности в точке измерений, чем данные метеозондирования с отдалённой метеостанции. Разумеется, желательно также нахождение эквивалентных частот путём непосредственного усреднения рассчитанной оптической толщины (1), (5) по АЧХ используемого приёмника с последующим сравнением получающихся результатов, выявлением возможных систематических ошибок или модельных ограничений и последовательной оценкой точности всех измерений. Подобную работу во многом ещё предстоит сделать.

Подчеркнём, что на значения найденных эквивалентных частот и измеренных эффективных оптических толщин влияют и спектральные зависимости коэффициентов поглощения кислорода и паров воды, а также, возможно, других присутствующих компонент атмосферы, вклад которых зависит от сезона, метеорологических условий и местоположения рассматриваемой площадки радионаблюдений. Именно это влияние представляет особый интерес и заслуживает специального исследования, в том числе с использованием развиваемой нами методики.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье разработан метод нахождения и осуществлена согласованная оценка коэффициентов удельного поглощения паров воды и кислорода и эквивалентных частот радиометров миллиметрового диапазона длин волн в составе комплекса МИАП-2, основанная на экспериментальных данных и модели спектра поглощения атмосферы MPM Liebe. Результаты двух независимых экспериментов по вычислению коэффициентов удельного поглощения совпали с точностью до ошибки измерения и оказались инварианты по отношению к методу определения интегральной влажности.

Результаты проведённых исследований выявляют несовершенство использованной измерительной аппаратуры, с одной стороны, и указывают на возможность учесть имеющиеся технические недостатки оборудования — с другой. Ввиду отсутствия в природе эталонной атмосферы, по которой можно было бы проводить калибровку атмосферных радиометров, согласование одновременных измерений параметров реальной атмосферы доверенным метеоприбором и калибруемым радиометром представляется наиболее эффективным методом прямой калибровки таких несовершенных широкополосных радиометров. Спектральные особенности прозрачности атмосферы в миллиметровом диапазоне позволяют связать параметры ее оптической толщины с содержанием компонент, определяющих эту прозрачность, и определить эквивалентные частоты для измеренных эффективных оптических толщин в соответствии с частотной зависимостью коэффициентов удельного поглощения данных компонент. Полученные нами результаты свидетельствуют об универсальности предложенной методики оценки искомых коэффициентов поглощения и эквивалентных частот. Данные результаты могут применяться для любых широкополосных радиометров, которые измеряют эффективную оптическую толщину атмосферы по методу атмосферных разрезов.

Экспедиционные работы на архипелаге Шпицберген выполнялись в рамках научной программы Совета по грантам Президента РФ СП-5103.2018.3. Техническое и научное сопровождение экспедиционных экспериментов по исследованию распространения субтерагерцовых волн проводилось в рамках проекта РФФИ (19-19-00499). Обработка данных выполнялась при частичной поддержке госзадания ИПФ РАН (0035-2019-0005). Фотометрические наблюдения в г. Баренцбург проводились в рамках госзадания ИОА СО РАН (рег. № АААА-А17-117021310142-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щеглов П. В. Проблемы оптической астрономии. М.: Наука, 1980.
2. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
3. Каплан С. А., Элементарная радиоастрономия, М.: Наука, 1964.
4. Шарков Е. А, Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: Физические основы, в 2 т. М.: Механика, управление и автоматика, 2014.
5. Кисляков А. Г. // Радиотехника и электроника. 1968. Т. 13, № 7. С. 1161.
6. Носов В. И., Большаков О. С., Бубнов Г. М. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 3. С. 49.
7. GNSS — global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. / ed by Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. Springer Science & Business Media, 2007. 10.1007/978-3-211-73017-1.
8. Кадыгров Е. Н., Горелик А. Г., Миллер Е. А. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 6. С. 459.
9. Федосеев Л. И., Божков В. Г., Геннеберг В. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10–11. С. 930.
10. Bubnov G. M., Vdovin V. F., Zemlyanukha P. M., et al., // Proc. 29th ISSTT, March 26–28, 2018. Pasadena, California, USA, p. 105.
11. Свидетельство (программа для ЭВМ) № 2019664403. Программа для обработки данных о прозрачности атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн. / Землянуха П. М., Бубнов Г. М.
12. Бубнов Г. М., Артеменко Ю. Н., Вдовин В. Ф. и др. // X Всеросс. семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 29 февраля–3 марта 2016, с. 99.
13. Ulich B. L. // Astrophys. Lett. 1980. V. 21. P. 21.
14. Bubnov G. M., Abashin E. B., Bolshakov O. S., et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technology. 2015. V. 5, No. 1. P. 64.
15. Bubnov G. M., Vdovin V. F., Bukov V. Yu, et al. // 32nd URSI GASS, Paper F6-1(2225), Montreal, 19–26 August 2017.
16. Bubnov G. M., Vdovin V. F., Zemlyanukha P. M., et al. // Terahertz Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (TERA-2018), EPJ Web of Conferences 195, 09002 (2018), N. Novgorod, October 22–25, 2018.
17. Арсаев И. Е., Быков В. Ю., Ильин Г. Н. и др. // Измерительная техника. 2017. № 5. С. 60.
18. Sato K., Realini E., Tsuda T., et al. // J. Disaster Res. 2013. V. 8, No. 1. P. 37.
19. Zhao Q., Yao Y., Yao W., Zhang S. // J. Atmosph. Solar-Terr. Phys. 2019. V. 182. P. 85.
20. Титов Е. В., Широкий С. М., Ильин Г. Н., Троицкий А. В. // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2016. № 36. С. 90.
21. Ильин Г. Н., Троицкий А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 4. С. 326.
22. Сакерин С. М., Кабанов Д. М., Радионов В. Ф. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 11. С. 948.
23. Кабанов Д. М., Сакерин С. М. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8, № 6. С. 852.
24. Сакерин С. М., Кабанов Д. М., Ростов А. П. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1112.
25. <http://home.olemiss.edu/~xdang/papers/MTSE.pdf> .
26. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort, et al. // J. Machine Learning Res. 2011. V. 12. P. 2825.
27. Newville M., Otten R., Nelson A., et al. // Zenodo. 2019. <http://doi.org/10.5281/zenodo.2620617>

28. Liebe H. J., Rosenkranz P. W., Hufford G. A. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1992. V. 48, No. 5–6. P. 629.
29. Третьяков М. Ю. Высокоточная резонаторная спектроскопия атмосферных газов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн: Дис. д-ра физ.-мат. наук. г. Нижний Новгород, 2016. 320 с.

Поступила в редакцию 8 июля 2019 г.; принята в печать 10 декабря 2019 г.

**CONSISTENT DETERMINATION OF THE INTEGRAL HUMIDITY
AND EFFECTIVE OPTICAL DEPTH OF THE ATMOSPHERE
IN THE MILLIMETER WAVELENGTH RANGE USING WIDEBAND
RADIOMETERS**

*G. M. Bubnov, V. F. Grigor'ev, I. I. Zimchenko, P. M. Zemlyanukha, G. N. Il'in, D. M. Kabanov,
V. I. Nosov, and V. F. Vdovin*

This paper proposes, and practically implements, a technique for finding equivalent frequencies, which are attributed to the atmospheric optical depths measured by a two-channel wideband radiometric system in the millimeter wavelength range. Establishment of the equivalent frequency (averaged over the frequency response of the system) in the corresponding atmospheric transparency window makes it possible to couple wideband measurements of the optical depth with narrowband radiometric measurements used in standard calculations of integral humidity. The search for equivalent frequencies is based on a comparison of experimental data on the effective transparency in the millimeter wavelength range and integral humidity of the atmosphere by using simulation of a real atmosphere with the MPM Liebe model. The developed method of consistent determination of humidity and transparency of the atmosphere in the millimeter wavelength range can be used for both millimeter-wave radioastronomy and high-performance space telecommunications. In particular, the method specifies the spectral characteristics of the measured atmospheric transparency for the studied radio astronomy site and estimates the astroclimate conditions.