

УДК 537.876+551.51

ПРОТОТИП ДВУХВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ И ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ НА СТАНЦИИ «КАРА-ДАГ» ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

И. Т. Бубукин^{1}, М. И. Агафонов¹, И. В. Ракуть^{1,2,3}, А. Л. Панкратов^{1,2,3},
А. А. Яблоков^{2,3}, А. В. Троицкий¹, А. С. Приймак⁴, Р. В. Горбунов⁴*

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского;

² Институт физики микроструктур РАН;

³ Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева г. Нижний Новгород;

⁴ Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН, г. Севастополь, Россия

Обсуждаются результаты исследований атмосферного поглощения на территории радиоастрономической станции «Кара-Даг» в Крыму в окнах прозрачности миллиметрового диапазона длин волн. Проведён критический анализ использованного аппаратного комплекса и методик измерений, что позволит создать более совершенную радиометрическую систему для выполнения длительных атмосферных измерений. Показана связь атмосферного поглощения на станции «Кара-Даг» с климатическими особенностями местоположения станции. Бимодальное распределение поглощения объяснено наличием господствующего северного ветра.

ВВЕДЕНИЕ

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

В данной работе представлены результаты исследований атмосферного поглощения на территории радиоастрономической станции «Кара-Даг» в Крыму в окнах прозрачности миллиметрового диапазона длин волн. Проведён критический анализ использованного аппаратного комплекса и методик измерений, что позволит создать более совершенную радиометрическую систему для выполнения длительных атмосферных измерений. Показана связь атмосферного поглощения на станции «Кара-Даг» с климатическими особенностями её местоположения.

1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ПОГЛОЩЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ В ОКНАХ ПРОЗРАЧНОСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АТМОСФЕРНЫХ РАЗРЕЗОВ

В 2017 году измерения на радиоастрономической станции «Кара-Даг» проводились с помощью радиометрического комплекса МИАП-2 [1, 2]. Установка МИАП-2 представляет собой радиометрическую систему, в составе которой имеются два радиометра в общем корпусе с рупорно-линзовыми антеннами, имеющими ширину диаграммы направленности 2,5°. Рабочие диапазоны

* bubn@nirfi.unn.ru

радиометров составляют $84 \div 99$ и $132 \div 148$ ГГц. Комплекс позволяет измерять оптическую толщину атмосферы в окнах прозрачности вблизи длин волн 2 и 3 мм при помощи метода атмосферных разрезов.

Для определения полного вертикального поглощения в атмосфере комплекс МИАП-2 устанавливался на радиоастрономической станции «Кара-Даг» в летне-осенний период 2017 года на высоте 105 м от уровня моря. Измерения яркостной температуры атмосферы проводились для углов $\theta_1 = 60,5^\circ$; $\theta_2 = 76,3^\circ$; $\theta_3 = 81,4^\circ$; $\theta_4 = 84,2^\circ$ и $\theta_5 = 88,6^\circ$ от зенита в вертикальной плоскости, проходящей через открытую область пространства над кромкой горизонта моря [3, 4].

Метод атмосферных разрезов [5] применим для плоскостной модели атмосферы. В этом случае яркостная температура атмосферы (в кельвинах) записывается как

$$T_{\text{Я}}(\theta) = T_{\text{ср}}[1 - \exp(-\tau / \cos \theta)] + 2,73 \exp(-\tau / \cos \theta), \quad (1)$$

где τ — полное вертикальное поглощение в атмосфере, $T_{\text{ср}}$ — средневзвешенная по коэффициенту поглощения температура атмосферы. Второе слагаемое в (1) связано с реликтовым космическим излучением.

Все алгоритмы обработки данных, полученных методом атмосферных разрезов, основаны на использовании безразмерных отношений приращений сигналов на выходе радиометрического приёмника для трёх углов визирования. В работе [4] были проанализированы два метода нахождения атмосферного поглощения по атмосферному разрезу.

Метод 1 представляет собой вычисление поглощения путём измерений для трёх углов [6]. Трансцендентное уравнение по τ (1) решается методом последовательных приближений. Данные для углов θ_4 и θ_5 не используются, поскольку эти углы находятся в области, где измеряемая величина не подчиняется модели плоскостной атмосферы.

Метод 2 представляет собой вычисление поглощения по двум углам и опорной области с яркостной температурой, близкой к температуре приземного воздуха [5]. Для одного из углов вместо излучения атмосферы используется излучение опорной области d_0 с яркостной температурой, близкой к температуре приземного воздуха. Величину средней температуры атмосферы в (1) можно получить из соотношения [6]

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_0 - 2,73 \left[\frac{d_0 - d(\theta_1)}{d(\theta_2) - d(\theta_1)} \exp(-\tau \sec \theta_2) - \frac{d_0 - d(\theta_2)}{d(\theta_2) - d(\theta_1)} \exp(-\tau \sec \theta_1) \right]}{1 - \left[\frac{d_0 - d(\theta_1)}{d(\theta_2) - d(\theta_1)} \exp(-\tau \sec \theta_2) - \frac{d_0 - d(\theta_2)}{d(\theta_2) - d(\theta_1)} \exp(-\tau \sec \theta_1) \right]} \quad (2)$$

где $d(\theta_i)$ — сигнал на выходе приёмника при соответствующем угле измерения. В качестве опорной области при измерениях 2017 года использовалось излучение атмосферы с зенитным углом $\theta_5 = 88,6^\circ$.

Определить среднее поглощение и вычислить ошибку измерений можно с использованием другого варианта этого метода. Преобразование (1) и логарифмирование позволяет получить линейное по τ соотношение для применения метода наименьших квадратов. В измерениях 2017 года для обработки использованы углы θ_1 , θ_2 и θ_3 . Следует отметить, что, в отличие от методики, используемой в работах [1, 2], в данном варианте метода наименьших квадратов результаты измерений для углов $\theta_4 = 84,2^\circ$ и $\theta_5 = 88,6^\circ$ не учитывались, т. к. эти углы не входят в область применимости модели плоскостной атмосферы. Использование данных измерений для этих углов может приводить как к уменьшению так и к существенному завышению поглощения при нестабильной работе приёмника 2-миллиметрового канала МИАП-2 по сравнению с классическим методом [5] (см., например, ряд отсчётов на уровне около 1 Нп на рис. 2 в работе [2]). Кроме

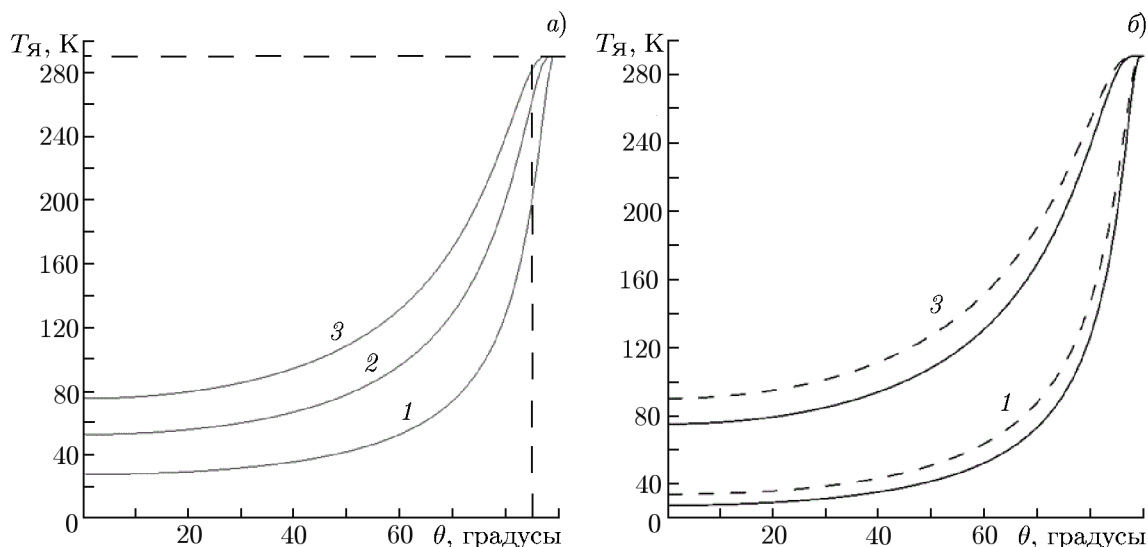


Рис. 1. Зависимости яркостной температуры атмосферы $T_{\text{Я}}(\theta)$, полученные в приближении плоско-слоистой атмосферы для средней температуры атмосферы $T_{\text{ср}} = 291 \text{ K}$ и трёх значений атмосферного поглощения $\tau = 0,1$ (сплошные кривые 1); $0,2$ (сплошная кривая 2); $0,3$ (сплошные кривые 3). Штриховыми линиями на панели б представлены яркостные температуры атмосферы при измерениях широкополосным приёмником $T_{\text{Я}}^{\text{Ш}}(\theta)$ для тех же значений τ

того, в нашем случае было использовано дополнительное условие для кривой, полученной методом наименьших квадратов: её прохождение точно через отсчёт θ_5 , соответствующий опорной области.

Анализ показывает, что для поглощений в окнах прозрачности коротковолновой части миллиметрового диапазона излучение атмосферы на пригоризонтных углах не является чёрнотельным. На рис. 1а показана зависимость $T_{\text{Я}}(\theta)$, полученная из выражения (1) для $T_{\text{ср}} = 291 \text{ K}$ и значений атмосферного поглощения $\tau = 0,1$ (кривая 1), $\tau = 0,2$ (кривая 2) и $\tau = 0,3$ (кривая 3), характерных для окон прозрачности вблизи длин волн 2 и 3 мм. Из формы кривых видно, что в диапазоне углов $85^\circ \div 90^\circ$ вблизи горизонта яркостная температура меньше максимального значения. При этом нужно иметь в виду, что соотношение (1) при таких углах даёт завышенные значения из-за сферичности Земли, что при учёте этого эффекта приводит к ещё меньшим значениям яркостной температуры. Излучение атмосферы на пригоризонтных углах может использоваться как опорная область только при $\tau \geq 1$, например, вблизи линии поглощения кислорода на длине волны 5 мм. При малых поглощениях с этой целью может применяться специальное «чёрное тело» с низким коэффициентом отражения, расположенное в дальней зоне антенны, а также поросший лесом склон горы. Поэтому в измерениях 2018 года в качестве опорной области уже был использован лесистый склон мыса Меганом (см. рис. 2а), имеющий коэффициент чёрнотельности, близкий к единице. На фотографии представлен чёрнотельный диск, который применялся для проверки величины коэффициента отражения мыса Меганом.

Измерения 2017 года показали, что методы, использующие излучение атмосферы при угле θ_5 в качестве опорной области, в сравнении с методом 1, который использует кривизну угломестной зависимости на трёх промежуточных углах без привязки к опорной области, дают существенно разные результаты. Это хорошо видно из рис. 3а, на котором приведены результаты обработки трёхчасовой записи, полученной 03.08.2017 тремя рассмотренными методами для длины волны 3 мм [4]: методом трёх углов без привязки к опорной области (зелёные треугольники); методом двух углов и опорной области при θ_5 (синие крестики); с использованием метода наименьших

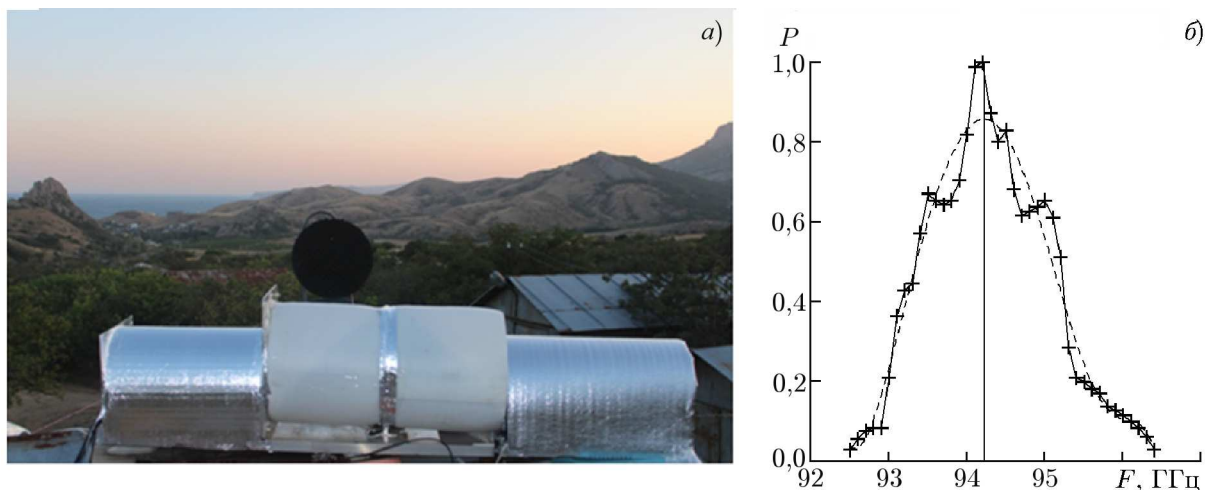


Рис. 2. Прототип двухволновой радиометрической системы атмосферной диагностики миллиметрового диапазона на крыше аппаратного домика радиоастрономической станции «Кара-Даг» во время калибровки (а). Амплитудно-частотная характеристика 3-миллиметрового канала радиометра (б)

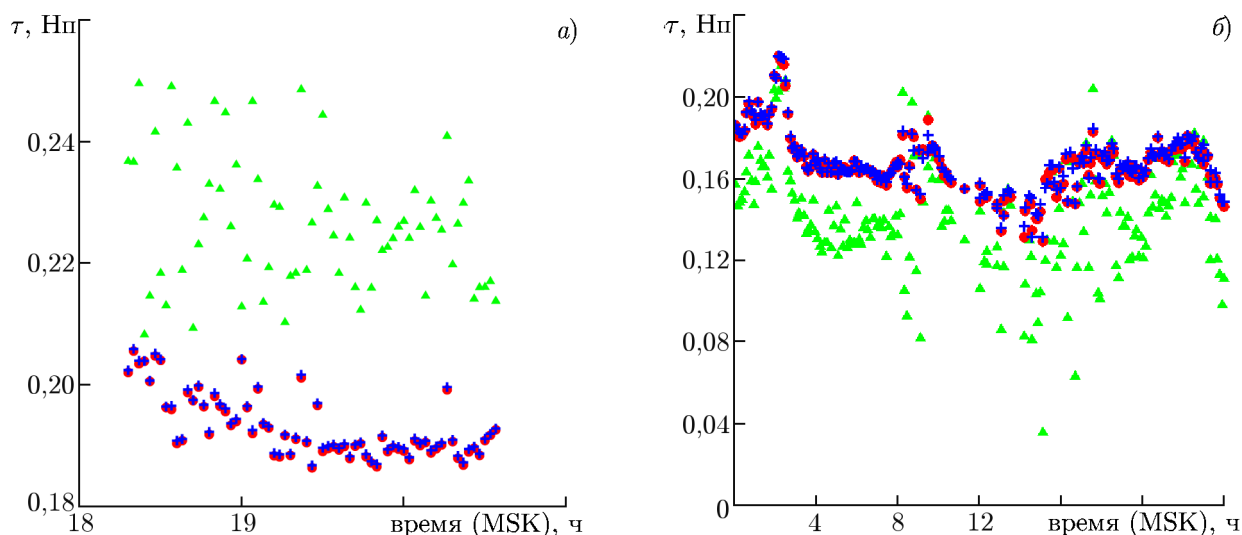


Рис. 3. Панель а: атмосферное поглощение в зените, полученное по измерениям 03.08.2017 на длине волны 3 мм методом трёх углов без привязки к опорной области (зелёные треугольники), методом двух углов и опорной области при угле θ_5 (синие крестики) и методом наименьших квадратов по трём углам и углу θ_5 (красные точки). Панель б: результаты обработки суточной записи 10.08.2018, сделанной приёмником на длине волны 3 мм с шириной полосы 2 ГГц методом трёх углов без привязки к опорной области (зелёные треугольники), методом двух углов и опорной области — горного склона (синие крестики) и методом наименьших квадратов по 8 углам (диапазон $0^\circ \div 70^\circ$, шаг 10°) и опорной области — горному склону (красные точки)

квадратов по трём углам с привлечением угла θ_5 (красные точки). Анализ данных измерений показал, что причиной расхождений является отличие между измеренной зависимостью яркостной температуры атмосферы $T_{\text{Я}}(\theta)$ для зенитных углов θ и результатом, получаемым из соотношения (1). Данное отличие связано с широкими полосами приёмников в приборе МИАП-2. Полоса приёма для длины волны 3 мм составляет 15 ГГц, а для длины волны 2 мм равна ширине двух зеркальных каналов по 4 ГГц. Атмосферное поглощение в пределах такой полосы прибора меняется приблизительно в 1,5 раза [7–9], что и приводит к зависимости $T_{\text{Я}}(\theta)$, отличной от $\cos \theta$.

Это иллюстрирует рис. 1б, на котором сплошными кривыми 1 и 3 показаны полученные из соотношения (1) зависимости $T_{\text{Я}}(\theta)$ для $\tau = 0,1$ и $0,3$ соответственно, а штриховыми — угломестные зависимости $T_{\text{Я}}^{\text{III}}(\theta)$ для тех же значений τ , моделирующие влияние на значение яркостной температуры широкой полосы приёмника:

$$T_{\text{Я}}^{\text{III}}(\theta) = \frac{T_{\text{ср}}}{2} \{ [1 - \exp(-\tau / \cos \theta)] + [1 - \exp(-1,5\tau / \cos \theta)] \}. \quad (3)$$

Штриховые кривые на рис. 1б имеют меньшую кривизну, что соответствует повышению значений поглощения при использовании метода 1.

С учётом выявленных недостатков комплекса МИАП-2 был создан новый прибор, включающий радиометры с длинами волн 3 и 2 мм, а также профессиональную метеостанцию Davis Vantage Pro 2. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) радиометра на длину волны 3 мм показана на рис. 2б. Сплошная линия соответствует измеренным значениям напряжения на выходе радиометра при перестройке частоты излучающего генератора с шагом 0,1 ГГц в диапазоне от 92,5 до 96,4 ГГц. Измеренные значения нормировались на их максимальную величину. Нулевой уровень соответствует измеренным значениям приёмника при выключенном генераторе, т. е., значению фонового излучения окружающей среды. Штриховой кривой представлена сглаженная измеренная АЧХ, сплошная вертикальная линия проходит через её максимум и соответствует частоте 94,22 ГГц. При этом сглаженная АЧХ практически симметрична относительно вертикальной линии до уровня 30 % от максимальной мощности приёма и соответствует ширине полосы 2,3 ГГц, что в 7 раз меньше, чем ширина полосы 3-миллиметрового канала МИАП-2. Радиометр на длину волны 2 мм имел основную частоту 140 ГГц при ширине полосы 3 ГГц. Он был предоставлен во временное пользование на ограниченный срок, поэтому из-за недостаточности набора данных на длине волны 2 мм для адекватной статистики эти результаты в статье не приводятся. Анализ результатов показал, что одновременное измерение на длинах волн 2 и 3 мм не несёт дополнительной информации из-за близости каналов по частоте и является рудиментом от методики МИАП-2.

Атмосферное поглощение в окнах прозрачности определяется атмосферным кислородом («сухая компонента»), водяным паром и капельной фракцией облаков (влажная компонента). Поглощение в кислороде является стабильным, т. к. «сухая» часть тропосферы находится в гидростатическом равновесии и её поглощение рассчитывается с приемлемой точностью по законам идеальных газов. Влажная компонента изменчива, и атмосферное поглощение в окнах прозрачности 8, 3 и 2 мм при безоблачной атмосфере позволяет определять одну и ту же величину — интегральное содержание водяных паров на луче зрения. По этой причине коэффициент корреляции флуктуаций атмосферного поглощения при ясной погоде в окнах прозрачности 3 и 2 мм превышает 0,9. Отношения поглощений в окнах прозрачности 3 и 2 мм начинают отличаться от величины, определяемой водяным паром, при наличии облачности. Поглощения в капельной фракции облаков и в водяном паре имеют разные частотные зависимости, что позволяет разделить вклад облаков и безоблачной атмосферы в поглощение в окнах прозрачности. Однако в этом случае каналы 3 и 2 мм в приборе МИАП-2 не являются оптимальными из-за малого отношения длин волн, равного 1,5. В обычно используемых каналах атмосферной диагностики с длинами волн 13,5 см и 8 мм отношение длин волн составляет 1,7. Более перспективным при измерениях в окнах прозрачности представляется использование длин волн 8 и 3 мм. Необходимо отметить, что данное утверждение относится только к сравнительному анализу их возможностей при сопоставлении с каналами 3 и 2 мм в приборе МИАП-2 в задаче измерений «астроклимата», т. е. атмосферного поглощения в окнах прозрачности атмосферы в миллиметровом диапазоне, где проводятся радиоастрономические измерения, а не ко всей задаче дистанционного зондирования

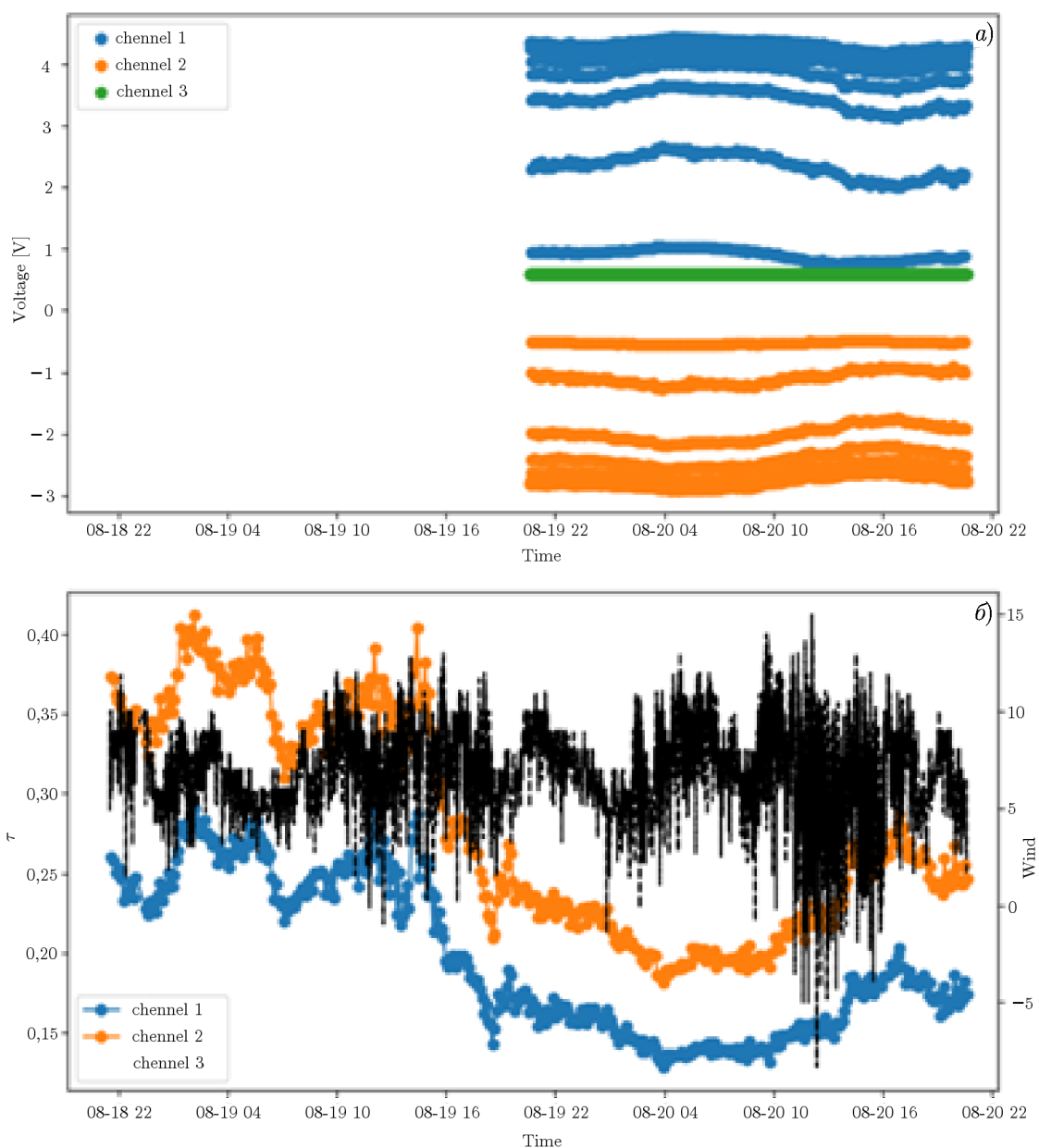


Рис. 4. Графический интерфейс управляющей программы (время на горизонтальной оси указано в формате «месяц-число час»). Панель *a*: напряжения, снимаемые на двух каналах радиометра (синий и оранжевый цвета) и напряжение на внутреннем термометре радиометра (зелёный цвет). Температура не меняется за счёт системы термостабилизации, реализованной в радиометре. Панель *б*: поглощение, вычисленное методом разрезов на основе данных на панели *a*. Чёрным изображена проекция скорости ветра на линию север—юг

атмосферы. Система дистанционного определения параметров атмосферы по её собственному излучению должна иметь другой набор частот, оптимизированных для решения этой задачи. Появившиеся в последнее время перестраиваемые в широком диапазоне приёмники, перекрывающие склон сильной линии водяного пара на частоте 183 ГГц и склоны линии 22 ГГц, позволяют повысить точность определения поглощения в атмосфере при малых влажностях и исследовать возможности восстановления высотного профиля влажности. В последнее время это вызывает

большой интерес, и авторы предполагают развивать данные направления в дальнейших работах. Для измерения интегрального содержания водяного пара в безоблачную погоду, т. е. задачи, которая рассматривается в статье, достаточно данных одного 3-миллиметрового канала, поэтому в данной работе представлены результаты только для этого канала.

Управление комплекса осуществлялось на основе разработанного в 2018 году общего программного пакета на языке Python. Графический интерфейс управляющей программы показан на рис. 4. На панели *а* представлены напряжения, снимаемые на двух каналах радиометра (синий и оранжевый цвета), зелёный цвет соответствует напряжению на внутреннем термометре радиометра. Температура не меняется за счёт системы термостабилизации, реализованной в радиометре. На панели *б* приведены графики поглощения, построенные методом разрезов по углам 20° и 90° , а также опорной области с яркостной температурой, близкой к температуре приземного воздуха, на основе данных, соответствующих рис. 4*а*. Чёрным цветом изображена проекция скорости ветра на линию север–юг. На рис. 3*б* представлены результаты обработки суточной записи, полученной 10.08.2018 рассмотренными методами для длины волны 3 мм (обозначения те же, что и на рис. 3*а*). Как можно видеть, для измерений 2018 года завышенные значения для метода 1 уже не наблюдаются. Оба варианта метода 2 по-прежнему дают практически совпадающие результаты, однако заметен увеличенный разброс значений при малых поглощениях, особенно для метода 1. Поэтому оптимальным вариантом представляется использование метода 2 с вычислением поглощения методом наименьших квадратов, а также с использованием горного склона в качестве опорной области. Увеличение ошибки измерений τ при малых поглощениях очевидно связано с уменьшением величины измеряемых ступенек яркостной температуры атмосферы, что свидетельствует о том, что выбранные частоты измерений в окнах прозрачности миллиметрового диапазона не являются оптимальными для задачи определения параметров атмосферы.

2. ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ НА РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «КАРА-ДАГ» В КРЫМУ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 5*а* приведены результаты измерений атмосферного поглощения новым прибором, описанным ранее в разделе 1. Данные получены в августе–сентябре 2018 года для длины волны 3 мм при ясной безоблачной атмосфере (шкала слева). Как было сказано выше, использованная методика измерений применима для модели плоскостной атмосферы, поэтому ситуации с облачностью и осадками исключались из рассмотрения. Для обработки данных применялся метод 2 с вычислением поглощения в диапазоне углов $0^\circ \div 70^\circ$ с шагом 10° методом наименьших квадратов. Метеоизмерения проводились профессиональной метеостанцией Davis Vantage Pro 2. Как видно из рис. 5*а*, в период с 10 по 22 августа наблюдалась ситуация с малыми атмосферными поглощениями $0,1 \div 0,2$ Нп (шкала слева), соответствующими интегральному влагосодержанию $0,5 \div 2,0$ г/см² (шкала справа), или $5 \div 20$ мм осаждаемой влаги (единицы измерения, принятые в астрономии). В отличие от дождливого летнего сезона 2017 года [4], рассматриваемый временной интервал 2018 года был достаточно сухим, за исключением периода 6–8 сентября, когда по побережью Краснодарского края и Крыма прошли шторм и смерчи. Несмотря на данный катаклизм, в течение изучаемого промежутка времени с августа по сентябрь 2018 года (61 день) ровно половина исследуемого временного промежутка (31 день) характеризовалась отсутствием облачности или незначительным покрытием обозримого небесного пространства. В наблюдаемый период времени преобладали восточные и северо-восточные направления ветров, несмотря на то, что район исследования приближен к береговой черте и должен испытывать воздействие бризов. Изменению данной обстановки способствовали прорывы преимущественно южных ветров

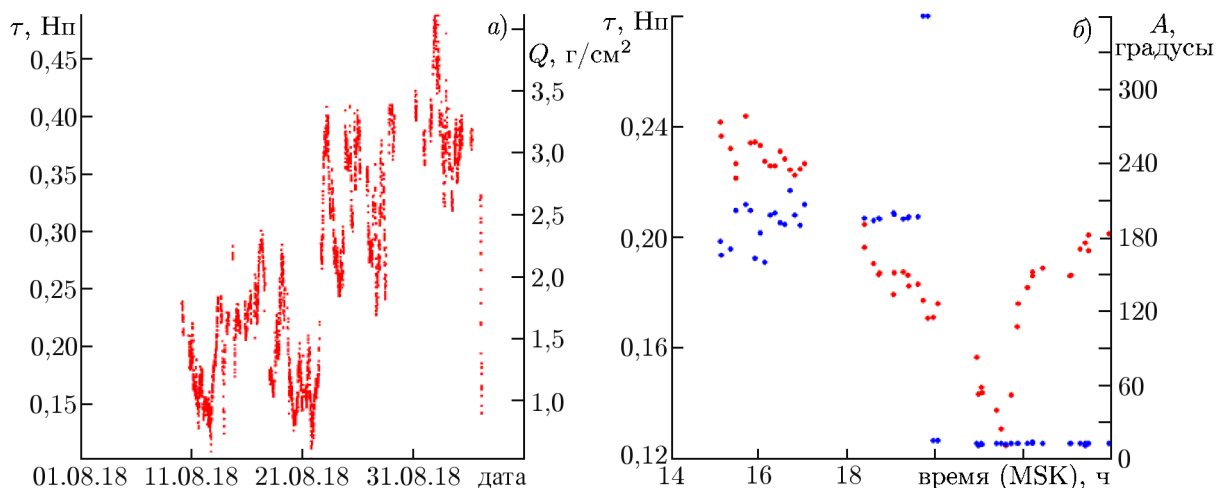


Рис. 5. Панель *а*: результаты измерений атмосферного поглощения в августе–сентябре 2018 года для длины волны 3 мм при ясной безоблачной атмосфере (шкала слева) и соответствующее им интегральное влагосодержание (шкала справа). Панель *б*: временная зависимость атмосферного поглощения на длине волны 3 мм 13.08.2018 (красные точки, шкала слева) и направления ветра (синие точки, шкала справа)

(13.08–16.08, 22.08) в дневное время, на фоне которых происходил рост поглощения. Их частота, наряду с увеличением усреднённых показаний радиометра, усилилась к концу августа (25.08, 26.08, 28.08, 31.08, 1–3.09), и уже с начала сентября погодные условия стали характеризоваться частыми ливневыми дождями и грозами. Исходя из этого, можно предположить, что из-за особенностей рельефа в районе исследования сформировался свой микроклимат с характерными для него ветрами. Если на фоне увеличения показаний радиометра происходит нарушение ветровой обстановки, это может быть предвестником наступления воздушных масс более высокого масштаба, влекущих за собой изменения погодных условий.

На рис. 5б показана временная зависимость атмосферного поглощения на длине волны 3 мм в период 13.08.2018 (красные точки, шкала слева) и направления ветра (синие точки, шкала справа). Северному ветру соответствует азимут A вблизи 0° и 360° , южному — вблизи 180° . Из рисунка видно, что спад поглощения отвечает изменению направления ветра с южного на северное. Гистограмма поглощений за период 10–22.08.2018 показана на рис. 6. Как и в 2017 году [4], она имеет два максимума, при этом из-за преобладания северных ветров в данный период левый максимум, соответствующий малым поглощениям, больше, чем правый. Увеличение величины поглощения, произошедшее после 22.08.2018 и показанное на рис. 5а, очевидно связано с заносом циклоном более влажного воздуха на территорию степного Крыма. Необходимо отметить, что значительный промежуток времени (около двух недель), в течение которого над территорией степного Крыма происходила замена сухого воздуха под внешним воздействием цик-

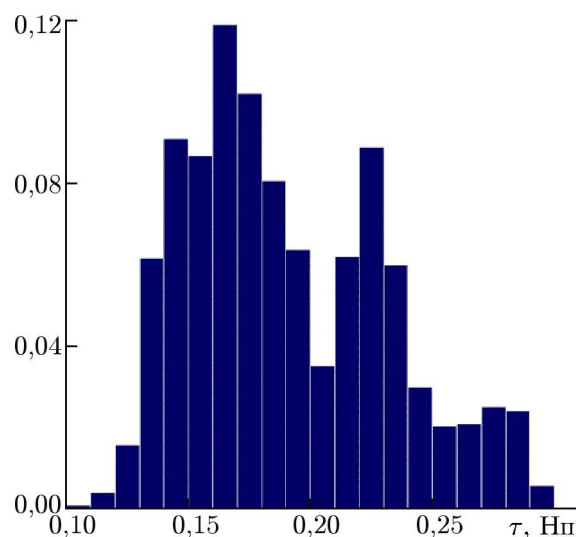


Рис. 6. Гистограмма поглощений за период 10–22.08.2018

лона, характеризует высокую стабильность ситуации с низкими атмосферными поглощениями в летне-осенний период в юго-восточном Крыму.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследований атмосферного поглощения на территории радиоастрономической станции «Кара-Даг» в окнах прозрачности миллиметрового диапазона длин волн. Проведён критический анализ использованного аппаратного комплекса и методик измерений, что позволит создать более совершенную радиометрическую систему для проведения круглогодичных атмосферных измерений. Задача диагностики состояния атмосферы, включающая определение влаго- и водосодержания, а также температурное зондирование, может быть решена измерением излучения атмосферы в окнах прозрачности в миллиметровом диапазоне длин волн (3 и 2 мм) и линиях поглощения водяного пара (1,64 мм) и кислорода (5 мм). По сравнению с традиционными системами, работающими в коротковолновой части сантиметрового диапазона, комплекс миллиметрового диапазона будет иметь более высокую точность измерения параметров атмосферы, более высокое пространственное разрешение, меньшие весовые и габаритные характеристики и более высокую помехоустойчивость.

Показана связь атмосферного поглощения на радиоастрономической станции «КараДаг» с климатическими особенностями её местоположения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проекты государственного задания ННГУ 3.8070.2017/8.9, НГТУ 16.2562.2017/ПЧ, ФИЦ ИПФ РАН 0035–2014–0206 и ФИЦ ИнБЮМ АААА-А19-119061190081-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носов В. И., Большаков О. С., Бубнов Г. М. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2016. Т. 59, № 3. С. 49–56.
2. Бубнов Г. М., Артеменко Ю. Н., Вдовин В. Ф. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 8–9. С. 852.
3. Агафонов М. И., Бубнов Г. М., Бубукин И. Т. и др. // Астрофизический бюллетень. 2018. Т. 73. № 3. С. 412–417.
4. Бубукин И. Т., Ракуть И. В., Агафонов М. И. и др. // Журн. exper. теор. физ. 2019. Т. 156, вып. 1(7). С. 43.
5. Кисляков А. Г., Станкевич К. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10. С. 1213.
6. Бубукин И. Т., Станкевич К. С. // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. № 11. С. 39.
7. Жевакин С. А., Наумов А. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10, № 9–10. С. 1213.
8. Rozenkranz P. W. // J. Quantitative Spectrosc. Radiat. Transf. 1988. V. 39, No. 4. P. 287.
9. Катков В. Ю. // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42, № 12. С. 1441.

Поступила в редакцию 22 апреля 2019 г.; принята в печать 30 августа 2019 г.

**PROTOTYPE OF A TWO-WAVE RADIOMETRIC SYSTEM OF THE MILLIMETER
WAVELENGTH RANGE FOR REMOTE SENSING OF THE ATMOSPHERE
AND FEATURES OF ATMOSPHERIC ABSORPTION AT KARA-DAG STATION
ACCORDING TO FIELD MEASUREMENTS**

*I. T. Bubukin, M. I. Agafonov, I. V. Rakut', A. L. Pankratov, A. A. Yablokov, A. V. Troitsky,
A. S. Priymak, and R. V. Gorbunov*

We discuss the results of the atmospheric absorption studies on the territory of the Kara-Dag radio astronomy station in Crimea in the millimeter-wavelength transparency windows. Critical analysis of the hardware system and measurement techniques is carried out, which permits one to create a more perfect radiometric system for long-term atmospheric measurements. Connection between atmospheric absorption at the Kara-Dag station and climatic features of the station location is shown. The bimodal distribution of absorption is explained by the prevailing north wind.