

DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.14

УДК: 521.98

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОПУСКАНИЯ АТМОСФЕРЫВ МЕСТАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ РАТАН-600, БТА И ЗТШ С ПОМОЩЬЮ ДВУХКАНАЛЬНОГО АТМОСФЕРНОГО РАДИОМЕТРА ИПАР-2

В.Б. Хайкин ^{1,6}, Е.М. Домбек ², А.Ю. Шиховцев ³, Павел М. Землянуха ², Петр М. Землянуха ², Г.А. Макоев ^{1,6}, Г.П. Назаров ⁴, Я.О. Водзяновский ⁴, А.В. Худченко ^{4,5}

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, пос. Нижний Архыз, Россия
 ² Институт Прикладной Физики РАН, Нижний Новгород, Россия
 ³Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
 ⁴Астро-космический центр ФИАН, Москва, Россия
 ⁵ Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Москва, Россия
 ⁶ Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 23 марта 2025 г.

Аннотация. В работе рассмотрены радиометрические методы определения оптической толщи атмосферы и осажденного водяного пара. Приведены первые результаты измерений радиояркостной температуры атмосферы *T*_b, пропускания атмосферы и осажденного водяного пара (PWV) в местах расположения РАТАН-600, БТА и ЗТШ с помощью двухканального атмосферного радиометра ИПАР-2. Показана хорошая сходимость результатов прямых радиометрических измерений осажденного водяного пара с оценками PWV, полученными по данным реанализа Era-5, высотным профилям температуры и влажности и удельному влагосодержанию атмосферы приземного слоя. Приводятся дальнейшие планы измерения пропускания атмосферы и радиометрческого PWV с помощью ИПАР-2 для комплексного изучения астроклимата возможных мест размещения ESMT.

Ключевые слова: субмиллиметровый телескоп, астроклимат, пропускание атмосферы, осажденный водяной пар, атмосферный радиометр.

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта РНФ N23-72–00041. **Автор для переписки:** Хайкин Владимир Борисович, vkhstu@mail.ru

Введение

В последние годы в РФ ведется поиск и астроклиматические исследования возможных мест размещения крупного субММ телескопа [1, 2, 3] в том числе в рамках проекта ESMT [4]. С целью изучения астроклимата возможных мест размещения ESMT организованы новые астропункты в Евразии: на пике Хулугайша (Восточный Саян), г.Курапдаг в Агульском районе Дагестана, АПП Ташанта в межгорной котловине республики Алтай и в районе расположения Альт-Азимутального (**FTA**) [5]. Большого Телескопа Ключевыми астроклиматическими показателями при выборе места для размещения такого инструмента являются статистики оптической толщи и осажденного водяного пара. В выбранных для этого местах также важны статистики облачности, облаков, скорости водозапаса осадков, ветра, показатели оптической турбулентности и качества астрономических (атмосферных) изображений (seeing), под которым обычно понимают полуширину длинноэкспозиционного изображения точечного источника на крупном телескопе в условиях реальной атмосферы.

Радиометрические методы измерения оптической толщи основаны на измерении радиояркостной температуры атмосферы или ее разностей на разных зенитных углах в приближении плоскослоистой атмосферы. В работе [5] приводятся ожидаемые радиояркостные температуры ясной и облачной атмосферы и ее оптической толщи в зените на волне 3 мм и 2 мм. Для измерения оптической толщи атмосферы (τ) наиболее часто используется метод атмосферных разрезов [6], который не требует абсолютной калибровки, а измерения могут выполняться в относительных единицах. В частности, в работе [7] решается система как минимум трех уравнений переноса излучения в плоскослоистой атмосфере радиометрическим измерением излучения атмосферы на трех углах. Однако метод разрезов недостаточно эффективен в случае облачной и неоднородной атмосферы. Абсолютный метод измерения т используется реже, поскольку требует тщательной температурной калибровки. достоинствами отсутствие Главными абсолютного метода являются

необходимости сканирования атмосферы, получение оптической толщи атмосферы в зените или в нужном направлении и устойчивость к метеоусловиям. В работе [8] показана высокая корреляция и сходимость значений PWV, полученных с помощью радиозондирования, ГНСС метода, реанализа Era-5 и (PBП) ИПА РАН [9]) радиометром водяного пара однако только радиометрический метод позволяет вести непрерывный мониторинг PWV в реальном масштабе времени. В настоящей работе приводятся первые результаты применения предложенного метода измерений пропускания атмосферы на волне 3 мм и полученные по ним PWV в местах расположения астрономических инструментов РАТАН-600, БТА и ЗТШ.

1. Методы измерения оптической толщи атмосферы

Известны три основных метода определения прозрачности атмосферы: метод Бугера, метод абсолютных измерений радиояркостных температур излучения атмосферы и метод атмосферных разрезов [6]. Фотометрический метод Бургера основан на измерении наблюдаемой звездной величины звезды на разных зенитных углах и используется для определения коэффициента оптической прозрачности (экстинкции). Известно еще несколько подобных методов определения прозрачности атмосферы по звездам, физическая сущность которых основана на увеличении поглощения атмосферы с увеличением атмосферной массы на трассе наблюдения звезд. К подобным методам относятся: метод Бугера, метод пары звезд, метод Никонова (метод контрольных звезд), метод Сарычева [10]. Аналогом метода Бугера в радиодиапазоне является радиоастрономический (РА) метод измерения оптической толщи атмосферы по Солнцу, где угломестное приращение (производная) антенной температуры Солнца на разных высотах позволяет определить оптическую толщу атмосферы днем. В РА методе интегральное поглощение слоистой горизонтальнооднородной атмосферы определяется как величина пропорциональная натуральному логарифму отношения угломестных приращений выходных сигналов радиометра на разных высотах Солнца [11]. Коэффициент

пропорциональности можно найти, измерив однократно оптическую толщу методом атмосферных разрезов, абсолютным методом или с помощью РВП.

В работе [12] предложен метод определения оптической толщи атмосферы в зените по яркости Солнца (Solar brightness method) на любом угле. В предположении плоскослоистой атмосфера и приближении Рэлея-Джинса, наблюдаемая антенная температура (T_{obs}) Солнца с яркостной температурой (T_{sun}) для заданного угла возвышения (θ) может быть выражена через уравнение переноса излучения [13, 12]:

$$T_{\rm obs}\left(\theta\right) = T_{\rm sky}\left[1 - e^{-\tau_{\rm sin\theta}}\right] + \eta T_{\rm sun}e^{-\tau_{\rm sin\theta}} + T_{\rm off}, \qquad (1)$$

где τ_0 – оптическая толща в Зените, T_{sky} – средняя температура неба, T_{off} – температура смещения, η – эффективность луча. При отсутствии источника:

$$T_{\rm obs}(\theta) = T_{\rm sky} \left[1 - e^{-\tau_{0/\sin\theta}} \right] + T_{\rm off}.$$
⁽²⁾

Метод разрезов предполагает измерение профиля $T_{obs}(\theta)$ и нахождение по нему τ_0 подгонкой (минимизацией) и потому не так важно в чем измеряется $T_{obs}(\theta)$.

При прохождении Солнца через диаграмму направленности (ДН) антенны или его горизонтальном сканировании измеряемая антенная температура спокойного Солнца над фоном будет равна:

$$T_{\rm obs}(\theta) = \eta T_{\rm sun}(\theta) e^{-\tau_{0/\sin\theta}}.$$
(3)

Произведение $P = \eta T_{sun}(\theta)$ можно рассматривать как максимально возможную антенную температуру спокойного Солнца, определяемую только Солнцем и антенной при полной прозрачности атмосферы ($\tau_0 = 0$). Для нахождения *P* можно пронаблюдать обычно спокойное в MM диапазоне Солнце вдали от линий поглощения кислорода на высоких углах в условиях ясного неба и очень низких значениях (PWV < 1 мм). Такие аномально сухие дни случаются в начале осени, в конце весны и даже летом при высоком положении Солнца, когда поглощением в парах воды можно пренебречь.

При таких малых PWV неизбежно возрастает сухая составляющая оптической толщи, связанная с вкладом кислорода, но ее можно учесть

расчетным путем для данной высоты места, что будет показано ниже. P также можно найти наблюдая один день Солнце с известной τ_0 , которую можно получить другим методом (разрезов, абсолютным методом, РВП):

$$P = \frac{T_{\text{obs}}(\theta)}{e^{-\tau_{0/\sin\theta}}}.$$
(4)

Тогда в другие дни:

$$\tau_0 = -\sin\theta \ln \frac{T_{obs}(\theta)}{P}.$$
(5)

Изложенный метод прост в применении, поскольку для измерения τ_0 нужно только периодически наблюдать Солнце, выделяя уровень спокойного Солнца над фоном в режиме прохождения или сканирования, предварительно измерив *P* в аномально сухой день или в день с известной τ_0 . Измерять $T_{obs}(\theta)$ и *P* можно в относительных единицах (например, в Вольтах или отсчетах АЦП), что не требует абсолютной температурной калибровки. Относительную калибровку приемника с помощью согласованной чернотельной нагрузки или генератора шума можно также выполнять в Вольтах или отсчетах АЦП. Метод в отличие от метода разрезов и абсолютного метода не требует знания T_{sky} и подходит для любых метеоусловий кроме дождя.

В работе [7] оптическая толща атмосферы находится методом атмосферных разрезов из уравнения переноса в приближении плоскослоистой атмосферы, которое в измеряемых единицах (Вольтах) можно записать как:

$$V(\alpha) = V_0 \left[1 - e^{-\tau_{0/\cos\alpha}} \right] + V_c, \qquad (6)$$

где V_0 – напряжение, связанное со средне-эффективной термодинамической температурой атмосферы $T_{\rm eff}$, V_c – вклад космического фона. Для нахождения оптической толщи τ и неизвестных констант V_0 и V_c , $V(\alpha)$ измеряется как минимум на 3–5 зенитных углах, полученная система уравнений решается методами минимизации (подгонки). Для решения задачи в условиях облачной атмосферы применяется вторая волна, что также позволяет найти водозапас облаков.

В работе [9] измерение оптической толщи выполняется РВП на заданном угле как в абсолютном методе, однако калибровка радиометрических данных и перевод их в шкалу абсолютных яркостных температур выполняется методом атмосферных «разрезов» при ясной атмосфере в диапазоне зенитных углов $\theta = 0^{\circ} \div 70^{\circ}$.

Как показано в работе [14] измерения оптической толщины могут быть выполнены относительно широкополосными радиометрами, неизбежно осуществляющими операцию определенного усреднения ПО частоте. Эквивалентная частота соответствует средневзвешенной по всей АЧХ приемника частоте, которую можно получить путем усреднения реальной АЧХ приемника.

Радиояркостные температуры атмосферы в Кельвинах на интересующей нас волне λ в зените можно определить из уравнения переноса в приближении плоскослоистой атмосферы как:

$$T_{b\lambda} = \left[1 - e^{-\tau_{\lambda}}\right] T_{\text{eff}} + 2.73 e^{-\tau_{\lambda}}.$$
(7)

Откуда можно найти оптическую толщу атмосферы в зените и ее пропускание $e^{-\tau_{\lambda}}$:

$$\tau_{\lambda} = ln \frac{\left(\frac{2.73}{T_{\rm eff}} - 1\right)}{\left(\frac{T_b}{T_{\rm eff}} - 1\right)},\tag{8}$$

где $T_{\rm eff}$ – усредненная эффективная термодинамическая температура, температура равномерно нагретой атмосферы, дающей такое же Планковское излучение, что и атмосфера с реальным распределением температуры по высоте, $T_{\rm eff}$ может быть найдена взвешиванием высотного профиля температуры высотным профилем плотности водяного пара, которые можно получить из зондовых данных [15]:

$$T_{\rm eff} = \frac{\int_0^H T(h)\rho(h)dh}{\int_0^H \rho(h)},$$
(9)

где T(h) – температурный профиль атмосферы [K], $\rho(h)$ – профиль плотности водяного пара атмосферы [г/м³]. В работе [16] интегрированием профилей парциального давления водяного пара и температуры в районе Нью-Йорка усредненной эффективной получена линейная регрессия температуры $T_{\rm m} = 55.8 + 0.77 T_{\rm s}$ [K] с среднеквадратичным отклонение 4.4 K, а с помощью обработки 8718 зондовых профилей на территории США в диапазоне широт 27°-65° с.ш. и диапазоне высот 0-1.6 км получена линейная регрессия для эффективной термодинамической температуры атмосферы $T_{\rm eff}$: $T_{\rm m} = 70.2 \text{ K} + 0.72 T_{\rm s}$ $(T_{\rm s}$ – поверхностная температура атмосферы) с среднеквадратичным отклонением 4.74 К, что дает относительную ошибку 2 % и в самых худших условиях приведет к ошибке определения PWV из-за усредненных профилей температуры и использования влажности, не превышающей 5 %. Применение формулы (9) с использованием радиозондовых данных аэрологической станции Минеральные воды в сентябре-октябре 2024 г позволило получить регрессию для T_{eff} в районе Минеральных вод (44.2 с.ш., 41.2 в.д. высота 310 м): $T_{\rm eff} \approx 55 \text{ K} + 0.75 T_{\rm s}$ с среднеквадратичным отклонением не более 5 К. Несмотря на хорошее соответствие полученных регрессий отметим что взвешивание профиля температуры профилем влажности подходит в случае доминирования вклада водяного пара в оптическую толщу, что характерно для PWV > 3 мм. При очень сухой атмосфере взвешивание температурного профиля нужно производить более сложным способом с учетом расчетного профиля коэффициента поглощения и оптической толщи, отражающих вклады кислорода и водяного пара [6,15]. Однако как показано в работе [16] полученная линейная регрессия для широкого диапазона широт США от Аляски до Флориды неплохо работает как летом при $T_s > +25^{\circ}$ C когда PWV нередко становится выше 25 мм так и зимой при $T_{\rm s}$ < -25°C, когда PWV нередко падает ниже 3 мм.

С другой стороны интегральную оптическую толщу τ_{λ} атмосферы можно определить как [17]:

$$\tau_{\lambda} = \alpha(\lambda) \cdot \exp\left(\frac{-h}{h_0}\right) + \beta(\lambda) \cdot W + \gamma(\lambda) \cdot Q.$$
(9)

Для ясного неба:

$$\tau_{\lambda} = \alpha(\lambda) \cdot \exp\left(\frac{-h}{h_{0}}\right) + \beta(\lambda) \cdot W$$

$$W = \frac{\tau_{\lambda} - \alpha(\lambda) \cdot \exp\left(\frac{-h}{h_{0}}\right)}{\beta(\lambda)} \tau_{\lambda}$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{\tau_{o2}(\lambda, h)}{\exp\left(\frac{-h}{h_{0}}\right)}, \ \beta(\lambda) = \frac{\tau_{H2O}(\lambda, h)}{\int_{h}^{h_{0}} \rho(h) dh}, \ \gamma(\lambda) = \frac{\tau_{O}(\lambda, h)}{\int_{h_{1}}^{h_{2}} M(h) dh},$$
(10)

$$PWV = W = \int_{0}^{\infty} \rho(h) dh \ (3), \ Q = \int_{h_{1}}^{h_{2}} M(h) dh,$$
(11)

где $\tau_{\rm H2O}$ – оптическая толщина паров воды [Hn], $\tau_{\rm O2}$ – оптическая толщина кислорода [Hn], $\tau_{\rm Q}$ – оптическая толщина жидкокапельной воды [Hn], h – высота над уровнем моря (км), h_0 – характеристическая высота кислорода = 5.3 (км), h_2 - $h_1 = L$ – толщина облака, PWV – количество осаждаемой воды (мм), $\rho(h)$ –высотный профиль влажности [г/м³], M(h) – высотный профиль водности облака [кг/м³], Q – водозапас облаков [кг/м²]. Коэффициенты удельного поглощения в кислороде α [Hen], в парах воды β [Hen/мм] и в жидко-капельной воде γ [Hen*м²/кг] быстро растут с увеличением частоты и зависят от климатических условий и высоты места. Коэффициенты α , β и γ , связывающие оптическую толщу с PWV, вкладом кислорода и жидко-капельной воды можно рассчитать по моделям поглощения атмосферы с использованием высотных профилей. Методика расчета заключается в интегрировании погонного поглощения в данном диапазоне волн по высотным профилям давления P(h), температуры T(h) и влажности W(h) [17].

Расчетные радиояркостные температуры ясной атмосферы T_b и τ_0 в зените приведены на рис. 1. Коэффициенты α и β для расчета τ получены по модели поглощения MOLIERE с базой данных JPL в работе [18] и представлены в таблице 1, коэффициент γ , приведенный в таблице 1 взят из работы [1]. Модель MOLIERE включает в себя модель переноса миллиметрового и

субмиллиметрового излучения в условиях ясного неба и разработана под задачи измерений с применением различных приемных устройств. Как видно из рис. 1 в случае ясной атмосферы при значениях PWV = 2-3 мм наблюдается точка инверсии T_b , при облачной атмосфере инверсии не наблюдается. Поэтому месячная и годовая норма инверсий T_b может служить универсальной характеристикой качества астроклимата сайта. Чем больше на сайте ясных дней и чем ниже на нем PWV, тем больше на нем инверсий. Однако ожидаемая точка инверсии зависит от применяемой модели поглощения, а разные модели, как показано в [17] плохо сходятся между собой на одном сайте – одни модели лучше работают на высотных сайтах, другие на высоких частотах. Поэтому важно выбрать наиболее подходящую модель поглощения для данного сайта и диапазона частот, что определит точность оценки оптической толщи по значениям PWV и обратно.

| λ, мм | α, Неп | | β , Неп/мм | | у. Неп м ² /кг | |
|-------|--------|-------|------------------|-------|---------------------------|--|
| | Лето | Зима | Лето | Зима | γ, ΠΟΠ Μ / ΚΙ | |
| 3 | 0.125 | 0.009 | 0.122 | 0.008 | 0.195 | |
| 2 | 0.075 | 0.024 | 0.072 | 0.021 | 0.455 | |

Таблица 1. Коэффициенты α и β по модели поглощения MOLIERE.

Переход от оптической толщи к PWV и обратно требует, как видно из выражений (9)-(11) и сделанных выше пояснений, определенных усилий по вычислению или измерению удельных коэффициентов поглощения. Однако вид выражения (9) говорит о возможности нахождения линейной регрессии PWV. Так в работе [19] найдена линейная регрессия PWV = $a+b\tau_{212}$, где $a = 0.05 \pm 0.03$ и $b = 14.62 \pm 0.11$ [mm/Nepers] для сайта SST El Leonkito (Аргентина, 2.5 км). Показано, что корреляция PWV и τ на сайте достигает 97 % на частоте 212 ГГц, далекой от линий поглощения кислорода. Ясно, что в редкие дни сплошной облачности корреляция заметно снижается, но при переменной облачности всегда можно найти просвет на небе для использования найденной линейной регрессии.



Рис. 1. T_b (слева) и τ [Неп] (справа) ясной атмосферы на высоте 2000 м $\lambda = 3$ мм и $\lambda = 2$ мм для зимы w (-20°С) и лета s (+20°С).

Поэтому имея альтернативный способ измерения PWV (ГНСС метод, радиозондирование) очень полезно найти коэффициенты линейной регрессии PWV для места измерения оптической толщи на достаточно короткой волне, например, 2 мм, достаточно далекой от линии поглощения кислорода. Это позволит вести непрерывный радиометрический мониторинг PWV на волне 2 мм в хороших погодных условиях, когда только и становятся возможными субММ наблюдения.

Для нахождения оптической толщи атмосферы радиометрическим способом необходимо как следует из (2) измерить радиояркостную температуру атмосферы T_b в Кельвинах, что требует абсолютной калибровки радиометров. Специфика радиометрических измерений атмосферы состоит в том, что радиометр с рупором измеряет шумовую температуру системы, состоящей из самого приемника, рупора, атмосферы и космоса:

$$T_{\rm sys1} = T_{\rm rad} + T_{\rm horn} + T_{\rm b} + 2.73e^{-\tau}$$

Если радиометр накрыть чернотельной нагрузкой (АЧТ), то температура системы изменится:

$$T_{\rm sys2} = T_{\rm rad} + T_{\rm load} \,. \tag{13}$$

Тогда

$$T_{\rm rad} = T_{\rm sys2} - T_{\rm load}$$
.

Для получения T_{sys} в Кельвинах нужно сделать вторичную калибровку радиометра нагрев чернотельную нагрузку, например, с 25 °C до 55 °C и зная T_{load} при 25 °C (по лабораторным измерениям с крио и теплой нагрузкой) получим $T_b + T_{hom}$:

$$T_{\rm b} + T_{\rm hom} = T_{\rm sys1} - T_{\rm sys2} + T_{\rm load} - 2.73e^{-\tau_{\lambda}}.$$
 (15)

Поскольку мы не знаем τ_{λ} последним членом, отражающим вклад космического микроволнового фона (СМВ) в первом приближении можно пренебречь, а после нахождения T_b и τ_{λ} его учесть, уточнив T_b и τ_{λ} . Считая шумовую температуру рупора с низким рассеянием близкой к нулю получим T_b. Однако, это накладывает определенные требования на уровень боковых лепестков диаграммы направленности ДН рупора и закон их падения. Использование вместо гладких стенок рупора поверхностей с реактивным (гофрированный рупор) позволяет получить импедансом спадающее амплитудное распределение в его раскрыве в Е и Н плоскостях, малый уровень бокового излучения и, следовательно, низкий коэффициент рассеяния (КР). Для формирования синфазного плосковолнового фронта, сужения ДН рупора и одновременного снижения КР применяют гофрированные рупорно-линзовые антенны, где в диапазоне частот 20-36 ГГц достижим КР = 1 % при том, что потери в диэлектрической линзе из фторопласта в диапазоне 21-26 ГГц не превышают 1 % [20].

Измеряя радиояркостную температуру атмосферы T_b абсолютным радиометрическим методом находим τ_{λ} , от которой можно перейти к радиометрическому PWV. Коэффициенты удельного поглощения обычно находят из модели [18] или радиометрическим способом, предложенным в работе [14]. Для нахождения α и β радиометрическим способом также можно решить систему из двух уравнений типа (3) на двух длинах волн (например 3 мм

и 2 мм) в условиях ясного неба (Q = 0), измеряя при этом оптическую толщу радиометром, а PWV ГНСС методом. Зная α и β можно из системы двух уравнений типа (3) на тех же длинах волн найти γ и Q в условиях облачности.

Теперь рассмотрим альтернативный способ нахождения T_b и τ абсолютным радиометрическим методом, который не требует вторичной калибровки радиометров в полевых условиях и знания T_{load} , а опирается на первичную (лабораторную) калибровку. Запишем T_b в виде:

$$T_{\rm b} = \frac{1}{K} \left(V - V_0 - \Delta V \right) - 2.73 e^{-\tau_\lambda}, \tag{16},$$

где К [В/К] – первичная (лабораторная) калибровка радиометра при заданной температуре термостата, V [B] –измеренное радиометром значение шума в зените, V₀ [B]- ожидаемое значение шума радиометра при чернотельной нагрузке, охлажденной до абсолютного нуля (получается продлением прямой первичной калибровки при азотной и комнатной температурах до 0), $\Delta V[B]$ – вклад, вызванный близким расположением зданий, сооружений и земли в процессе измерений T_b, которые могут попадать в боковые лепестки рупора. $\Delta V = V - V_{\min}$, V_{\min} измеряется при удалении радиометра с рупором, направленным в зенит или под малым зенитным углом от зданий и сооружений, а также возвышением над землей настолько чтобы дальнейшее удаление или возвышение не уменьшало V_{min}. Последним членом в выражении (16) как и ранее в первом приближении можно пренебречь, а учесть его вклад после того, как станут известными T_b и τ_{λ} . Заметим, что в случае высокой оптической толщи ослабленный поглощением атмосферы член связанный с СМВ обнуляется, а при малой оптической толще его нужно учитывать для достижения высокой точности измерений T_b.

2. Оценка PWV по удельному влагосодержанию приземного слоя

В работе [21] предлагается оценивать интегральное влагосодержание атмосферы *W* с помощью удельного влагосодержания приземного слоя, полученного по метеоданным с учетом экспоненциального зависимости

распределения водяного пара по высоте. Это позволяет оценивать *W* как в текущий момент, так и в прошлом только по метеопараметрам и сравнивать ее с полученной *W* радиометрическим методом. При всех достоинствах такого простого метода нужно понимать его ограничения, связанные с возможным нарушением экспоненциальной зависимости в разное время суток, в различных климатических условиях и в разные сезоны что требует специального изучения. Устойчивая экспоненциальная зависимость влагосодержания с высотой может оказаться полезным дополнением к другим методам оценки *W* по крайней мере в условиях антициклонов. При наличии экспоненциальной зависимости удельное влагосодержание атмосферы описывается формулой:

$$W(h) = W_s e^{\frac{-h}{H_0}}, \tag{17}$$

где W(h) – удельное влагосодержание на высоте h [мм/км], W_s – удельное влагосодержание в приземном слое [мм/км], H_0 – эффективная высота водяного пара [км]. Интегрируя (17) по высоте получим интегральное влагосодержание атмосферы W:

$$W = W_{\rm s} H_0. \tag{18}$$

Для нахождения *W*_s будем использовать формулу [22]:

$$W_s = 2.16 \frac{fE^s}{t + 273},$$
 (19)

где f[%] – относительная влажность воздуха, t – температура воздуха [°C], E^{s} [мб] = 1.333 E^{s} [мм рт.ст.]– давление насыщенных паров воды при данной температуре. E^{s} [мм рт.ст.] можно найти из уравнения Антуана:

$$\log_{10}E^s = A - \frac{B}{t+C},$$

где A, B, C – экспериментальные справочные параметры для паров воды: A = 8.07131, B = 1730.63, C = 233.426.

При наличии единого постоянного экспоненциального распределения удельного влагосодержания с высотой *H*₀ должна быть постоянной и составлять ~ 2 км что требует проверки. Проверка заключается в построении зависимостей

 $W_{\rm s}$ от W для данного места в разное время года и в разное время суток. Разброс точек на графиках полученных зависимостей определяет отклонение от экспоненциальной зависимости удельного влагосодержания от высоты. На рис. 2 приведен график $W_{\rm s}$, построенный по метеоданным метеостанции Зеленчукская и БТА с 1.09.2024 по 10.10.2024.



3. Двухканальный атмосферный радиометр ИПАР-2

Для измерения пропускания атмосферы абсолютным методом был разработан Атмосферы Измеритель Пропускания Радиометрический двухканальный (ИПАР-2), который включает два радиометра на волну 3 мм и 2 мм, размещенных в термостатируемом боксе и направленных в зенит. Измерение T_b на двух волнах позволяет получать τ ясной и облачной атмосферы в зените, а также водозапас облаков. ИПАР-2 калибруется с помощью термостатируемой чернотельной нагрузки (\mathbf{HT}) заданной температуры, устанавливаемой над радиометрами. Калибровка включает в себя первичную (лабораторную) вторичную калибровку радиометра И c помощью термостатируемой полевой нагрузки с изменяемой температурой. Мы оцениваем чернотельность рельефной нагрузки, напечатанной на 3D принтере из теплопроводного и токопроводящего экструзионного поглощающего материала

на основе графита не хуже 0.994. На рис. 3 справа показан процесс испытаний ЧТ. Процесс первичной калибровки 3 мм радиометра и "полевой" ЧТ в УНУ "Криоинтеграл" ИРЭ РАН под руководством В.П.Кошельца и измерения АЧХ радиометра показан на рис. 4-6.

Автоматизированная версия ИПАР-2А разрабатывается с применением чопперного колеса (chopper wheel) с двумя ЧТ (рис. 3 слева). Чопперное колесо (ЧК) применяется в ИПАР-2А для измерения *T*_{load}. При использовании формулы (15) для вторичной калибровки. Температура радиометров в ИПАР-2А поддерживается с точностью ±1°С на уровне 25°С конвекцией воздуха внутри термостатируемого объема помощью ПИД терморегулятора с И тепловентилятора с задаваемой скоростью вращения. При той же температуре выполняется первичная калибровка радиометров в лаборатории с помощью согласованной нагрузки при двух температурах – комнатной температуре и температуре жидкого азота. Как показали наши измерения использование формулы (16) в условиях термостатирования радиометров дает существенно лучшие результаты абсолютных радиометрических измерений. Роль ЧК в этом случае сводится к измерению долговременной стабильности КУ и пределов ошибки измерений в полевых условиях. Поворот ЧК достаточно выполнять несколько раз перед началом и после окончания цикла измерений. Ошибку измерений $\Delta T_{\rm b}$ можно найти как $\Delta T_{\rm bnon} = (V_{\rm Hnon} - V_{\rm Hna6})/K$, где $V_{\rm Hnon}$ – напряжение при данной температуре ЧТ нагрузки в полевых условиях, V_{нлаб} – напряжение при той же температуре ЧТ нагрузки в лаборатории, что достигается измерением зависимости V_{нлаб}(*T*) в лаборатории. При высокой долговременной стабильности радиометров значение $\Delta T_{\text{нпол}}$ не должно отличаться от измеренной в лаборатории точности прибора.

В ИПАР-2А планируется установить ИК тепловизионную камеру Melexis 32x24 пикселя с полем зрения 55°, шумовой эквивалентной разностью температур (NETD) 0,1K/Гц^{1/2} RMS с частотой кадров 0.25–32 к/с. Это позволит сравнением ИК температуры неба в зените с окружающей температурой воздуха автоматически определять облачность, дымку, оценивать качество ясного неба,

изменение водности облаков. ИК температура поверхности ЧТ измеряется в определенном положении ЧК, в остальное время измеряется ИК температура неба. Ожидаемая точность измерений T_b с помощью ИПАР-2А не хуже ±2 К, что обеспечит точность измерения пропускания атмосферы не хуже 5 %, а точность измерения РWV – не хуже ±1 мм в условиях ясного неба.

Рис. 3. Модель автоматизированной версии ИПАР-2А (слева), испытания АЧТ для калибровки ИПАР-2 в АКЦ ФИАН (справа).

Первые пробные измерения T_b в зените с помощью ИПАР-2 с двумя радиометрами на волне 3 мм на радиотелескопе РАТАН-600 и в районе расположения БТА в условиях ясного неба в августе 2024 г показали хорошую повторяемость и сходимость полученных значений T_b [5]. На рис. 7-8 приведены результаты измерений T_b с вторичной температурной калибровкой на телескопах РАТАН-600 и БТА. Полученные абсолютные значения T_b в месте расположения БТА близки к ожидаемым на той же высоте (рис. 1).

Рис. 4. Калибровка 3 мм радиометра по холодной и теплой чернотельной нагрузке в ИРЭ РАН.

Рис. 5. Калибровка "полевой" термостатируемой чернотельной нагрузки.

Рис. 6. Фото экспериментальной установки для измерения АЧХ радиометра с помощью Фурье спектрометра на основе интерферометра Майкельсона ИРЭ РАН (слева), измеренная интерферограмма 3 мм радиометра (справа).

Рис. 7. Процесс измерений *T*_b с калибровкой двумя радиометрами 3 мм диапазона на радиотелескопе РАТАН-600 (высота 970 м) 8.08.2024 (слева), результат измерений *T*_b с калибровками (справа), полученные в начале измерений значения *T*_{b1} = 58.1 K, *T*_{b2} = 59.0 K, Δ*T*_b = 0.9 K.

Рис. 8. Процесс измерений T_b с калибровкой двумя радиометрами 3 мм диапазона на телескопе БТА (высота 2070 м) 9.08.2024 (слева), результат измерений T_b с калибровками (справа), полученные в начале измерений значения $T_{b1} = 33.1$ K, $T_{b2} = 37.0$ K, $\Delta T_b = 3.9$ K.

Заметим, что в ММ-субММ диапазонах волн следует учитывать нелинейную связь интенсивности излучения атмосферы и СМВ с эквивалентной температурой излучения в соответствии с законом Планка. Поскольку в Радиоастрономии пользуются законом Рэлея-Джинса, где указанная связь линейная, в ММ-субММ диапазонах нужно учитывать частотно-зависимую Планковскую поправку ΔT (v) к закону Рэлея-Джинса или к формуле Найквиста, по которой полезная мощность измеряемая радиометром пропорциональна

шумовой температуре согласованного резистора. Как результат измеряемая радиометром яркостная температура неба $T_{bobs} = T_b - \Delta T(v)$, где $\Delta T(v)$ составляет величину ~1-2 К в диапазоне волн 3–2 мм и ее необходимо учитывать в процессе измерений T_b .

4. Первые результаты измерения пропускания атмосферы в местах расположения РАТАН-600, БТА и ЗТШ

На рис. 9-12 приведены первые результаты измерений T_{b} , пропускания атмосферы и PWV на радиотелескопе PATAH-600 22-23.09.2024 и 28-30.09.2024 с помощью ИПАР-2 с одним радиометром на волне 3 мм. Удельные коэффициенты поглощения α и β для получения PWV здесь и далее взяты из работы [18], где они рассчитаны по модели MOLIERE (JPL).

Рис. 9. Результат абсолютных радиометрических измерений *T*_b, пропускания атмосферы и PWV с помощью ИПАР-2 с одним 3 мм радиометром на радиотелескопе РАТАН-600 22.09.2024.

Там же приведены высотные профили влажности, измеренные блоком сенсоров на квадрокоптере в 14:00 22.09.2024 и 28.09.2024 и полученные по ним значения PWV, которые хорошо соответствуют радиометрическим. На рис. 9 приведен пример высокого PWV, где вклад кучевых средних облаков низкой водности (Cu med) $\gamma/\beta * Q$, по нашим оценкам, не превышает 25 %. На рис. 10 приведен пример измерений $T_{\rm b}$, пропускания и PWV при ясном небе и прохождении гряды плоско-кучевых облаков (Cu hum) нижнего яруса. На рис. 11

приведен пример снижения PWV в условиях устойчивого антициклона. На рис. 12 приведено сравнение результатов радиометрических измерений с данными реанализа Era-5. На рис. 13 приведен результат измерений T_b , пропускания атмосферы и PWV в месте расположения БТА с помощью ИПАР-2 на волне 3 мм. Там же приведен высотный профиль влажности, измеренный блоком сенсоров на квадрокоптере и полученное по ним значения PWV. Радиометрические измерения проведены в последнюю ночь устойчивого антициклона с сухой и ясной погодой что позволило в ночь на 1.10.2024 зарегистрировать низкие значений PWV (рис. 12). Полет квадрокоптера был выполнен позже, утром, в условиях начала дождевой облачности, измерения с квадрокоптера показали PWV \approx 14 мм.

Рис. 10. Пример измерений *T*_b, пропускания атмосферы и осажденного водяного пара на радиотелескопе РАТАН-600 при ясном небе и прохождении гряды плоско-кучевых облаков нижнего яруса 22-23.09.2024 г.

Рис. 11. Результат абсолютных радиометрических измерений *T*_b, пропускания атмосферы и PWV с помощью ИПАР-2 с одним 3 мм радиометром на РАТАН-600 28.09.-30.09.2024.

Рис. 12. Изменение часовых значений PWV в сентябре-октябре 2024 г на РАТАН-600 по данным реанализа Era-5 и радиометрическим данным.

Рис. 13. Результат абсолютных радиометрических измерений *T*_b, пропускания атмосферы и PWV с помощью ИПАР-2 с радиометром на волну 3 мм на астропункте БТА (высота 2070 м) 30.09.-01.10.2024.

Рис. 14. Профили температуры и RH по данным радиозондирования аэрологической станции Минеральные воды (MPB) (слева), пример аппроксимации профиля AH экспонентой (справа).

Рис. 15. Примеры профилей абсолютной влажности, измеренные квадрокоптером в районе расположения БТА.

Рис. 16. PWV полученное по данным радиозондирования аэрологической станции Минеральные воды с помощью численного интегрирования профилей абсолютной влажности (PWV_{MPB2}) и аппроксимации их экспонентой (PWV_{MPB1}), по удельной приземной влажности (PWV_{пв}), по профилям температуры и RH, измеренным с помощью квадрокоптера в CAO PAH и экстраполированных экспонентой (PWV_{дрон}), по данным радиометрических измерений (PWV_{дрон}) и доши м расиодного EPA 5 (PWV).

измерений (PWV_{рад}) и данным реанализа ERA-5 (PWV_{ERA-5}) для БТА.

На рис. 14 представлены профили температуры и RH по данным радиозондирования на ближайшей к месту измерений аэрологической станции в

МРВ (135 км по прямой видимости). Примеры профилей абсолютной влажности, построенные по результатам измерений квадрокоптером в районе расположения БТА приведены на рис. 15. В профиле, приведенном на рис. 15 справа возможно наблюдалось подмерзание датчиков температуры и влажности на высоте выше 3000 м, данный профиль дает аномально 1.10.2024 высокое значение АНО, полученное в результате аппроксимации нижней части профиля экспонентой. Поэтому к полученному по нему PWV = 3.85 мм нужно относиться с осторожностью, хотя тенденция к снижению PWV в районе БТА в эти дни уверенно наблюдается и по всем другим данным, что видно из рис. 16.

Рис. 17. Результат абсолютных радиометрических измерений *T*_b, пропускания атмосферы и PWV с помощью ИПАР-2 с одним 3 мм радиометром в месте расположения ЗТШ КРАО (п.Научный) 04.10.-05.10.2024.

Рис. 18. Изменение часовых значений PWV 3-5.10.2024 по данным реанализа Ега-5 и ИПАР-2.

Приведенные ранее результаты абсолютных радиометрических измерений получены с использованием выражения (15). На рис. 19 красным цветом показан пример результатов радиометрических измерений в районе расположения ЗТШ, полученных по формуле (15) с пределами возможных ошибок (розовый цвет), которые оценены при многократном повторении локальных калибровок. Указанные пределы ошибок вызваны неточностью установки ЧТ, ошибками измерения его температуры, неравномерностью температуры поверхности ЧТ и же абсолютных Черным цветом показан пример результатов тех др. радиометрических измерений, полученных с использованием выражения (16) также с пределами возможных ошибок (серый цвет), которые включают оценку лабораторной точности выполнения калибровки, погрешность термостатирования, ошибку оценки влияния местных предметов и др. Калибровочные параметры K и V_0 для использования выражения (16) измерены в процессе лабораторной калибровки радиометров 3 мм и 2 мм диапазона в АКЦ ФИАН с помощью ЧТ нагрузки при комнатной температуре и температуре жидкого азота, параметр ΔV найден на месте проведения измерений (Таблица 2).

| 1 dominute 2. Reamopobe mble mapanerph 11 , 10 , $\Delta 1$ | Габлица 2. | Калиб | ровочные | парамет | ры <i>К</i> , | V_0, Λ | ΔV |
|---|------------|-------|----------|---------|---------------|----------------|------------|
|---|------------|-------|----------|---------|---------------|----------------|------------|

| Температура термостата, °С | <i>К</i> , В/К | V_0, \mathbf{B} | $\Delta V, B$ |
|----------------------------|----------------|-------------------|---------------|
| 40 | 0.00172 | 0.805 | 0.003 |

В пределах ошибок пропускания и PWV на рис. 19 добавлена ожидаемая ошибка оценки $T_{\rm eff}$ и погрешность вычисления удельных коэффициентов поглощения. Как видно из рис. 19 достижимая точность второго способа абсолютных измерений, не требующего вторичной (локальной) калибровки, заметно выше при том, что сам способ измерений много проще.

Мы оцениваем погрешность абсолютных радиометрических измерений T_b с ручной калибровкой ИПАР-2, которая применялась в пробных циклах радиометрических измерений в августе-октябре 2024 г не более ± 5 К, погрешность измерения PWV на РАТАН-600, БТА и ЗТШ не более ± 4 мм. При использовании нового способа измерений, основанного на применении выражения (16), который можно условно назвать "бескалибровочным" погрешность абсолютных радиометрических измерений T_b и PWV уменьшалась, по нашим оценкам, в 2–2.5 раза.

Рис. 19. Результаты абсолютных радиометрических измерений 4-5.10.2024 в районе расположения ЗТШ, полученные с использованием выражений (15) – красная линия и (16) – черная линия.

Заметим, что в работе [24] были впервые получены T_b атмосферы на волне 3.2 мм с помощью измерения оптической толщи методом атмосферных разрезов самим радиотелескопом РАТАН-600. Приводимые в работе [24] значения T_b в конце октября 1987 г при ясном небе находятся на уровне сухого предела, показанного на рис. 1 и заметно ниже тех что получены в настоящей работе на РАТАН-600 и БТА при устойчивом антициклоне в начале октября 2024 г. Несмотря на высокую тщательность выполнения измерений в работе [24] в ней нет оценок пределов погрешности T_b, но указано что использованный вариант метода разрезов [25] эффективен при больших оптических толщинах атмосферы (*τ* ≤ 1). Поэтому, данный метод мог давать заниженные значения оптической толщи и T_b при сухой и ясной атмосфере. В противном случае должны быть аномально сухие условия измерений, однако, согласно многолетним данным реанализа Era-5, они случаются на РАТАН-600 не чаще нескольких дней за зимний сезон. Вероятность их появления в конце октября-начале ноября 1987 г крайне низка, тем более приводимые в работе [24] значения приземной абсолютной влажности в период проведения измерений не соответствовали аномально сухим условиям, при которых сухой предел $T_{\rm b}$, показанный на рис. 1, становится возможным.

5. Дальнейшие планы

На телескопах РАТАН-600, БТА и ЗТШ в конце сентября-начале октября 2024 г были проведены пробные радиометрические измерения оптической толщи и PWV. Для изучения астроклимата в местах расположения телескопов РАТАН-600, БТА и ЗТШ необходим набор статистики в разные сезоны на двух волнах 3 мм/2мм с помощью автоматизированной версии ИПАР-2А. Указанные астропункты являются для нас астропунктами сравнения с новыми астропунктами в Дагестане на Саянах и Алтае но астроклимат района расположения БТА интересен и сам по себе, поскольку БТА рассматривается сегодня как возможный симулятор ММ/субММ телескопа [26]. Кроме того, в работе [26] достаточно смело предложено разместить 15 м прототип такого

телескопа на холме Семиродники (2340 м) 270 м выше БТА а это как минимум требует комплексных астроклиматических исследований.

Новые астропункты на Саянах, Алтае и Дагестане, организованные для размещения ESMT изучения возможных мест показывают высокие астроклиматические характеристики, в частности г.Курапдаг в Агульском районе Дагестана [27]. Однако как показали наши измерения [5] максимальные порывы ветра на г.Курапдаг могут достигать 40–50 м/с. В качестве альтернативы г.Курапдаг нами рассматривается г.Джуфудаг (3015 м), расположенная на границе Агульского района с Табасаранским, Хивским и Кайтагским районами в 28.5 км от г.Курапдаг. В отличие от г.Курапдаг, входящей в состав Самурского хребта, простирающегося на 193 км с юго-запада на северо-восток и относящегося к системе Бокового хребта Большого Кавказа, г.Джуфудаг входит в другой горный массив Большого Кавказа параллельный Самурскому хребту, в хребет Джуфудаг, где нет столь мощной горно-долинной циркуляции ветра. Это убедительно демонстрирует рис. 20, где по данным прогностической модели атмосферы ICON (Integrated COSMO model) построены гистограммы порывов ветра на г.Курапдаг, г.Джуфудаг и п.Терскол в ноябре месяце за последние 5 лет. Месяц ноябрь выбран как наиболее ветреный месяц года на хребте Джуфудаг по многолетним данным той же модели ICON. Существенно более спокойный режим ветра на г.Джуфудаг в сравнении с г.Курапдаг и другими горами Агульского и соседних районов подтверждается и по данным Era-5.

Рис. 20. Гистограммы порывов ветра на г.Курапдаг (3724 м), г.Джуфудаг (3015 м) и п.Терскол (3127 м) в ноябре месяце за последние 5 лет.

Несмотря на близость Каспийского моря (50 км), климат хребта Джуфудаг как и Самурского хребта сухой континентальный, а климат Большого Кавказа в целом умеренно-континентальный и переходит в средиземноморский на северозападе (предгорья черноморской Анапы) и на юго-востоке (дельта реки Самур на Каспие). Преобладающее направление ветра (ПНП) на г.Джуфужаг западно-югозападное (WSW). ПНП в значительной степени определяет PWV и оптическую толщу атмосферы в MM/субMM диапазоне волн. Так ПНП в месте расположения БТА на склоне горы Пастухова в КЧР южно-юго-западное (SSW) а в этом направлении всего в 70 км от БТА расположен г.Сухуми с его влажным субтропическим климатом.

Г.Джуфудаг имеет хорошие показатели общей облачности на уровне г.Курапдаг, однако уступает г.Курапдаг по медиане PWV на 15–20 %. Более низкие значения медианы PWV имеет плато Шунудаг (2963 м), расположенное в 33 км на северо-восток от г.Купадаг и являющее самым высокогорным плато Дагестана и РФ и самым крупным высокогорным плато Европы (~4.5x2.5 км). Режим ветра на плато Шунудаг достаточно спокойный, общая облачность на плато Шунудаг на 10 % ниже, чем на г.Джуфудаг. Несмотря на то, что плато

Шунудаг не дотягивает 37 м до высоты 3000 м оно по астроклиматическим условиям вполне может конкурировать с г.Курапдаг и г.Джуфудаг.

С учетом вышеизложенных соображений следующий цикл радиометрических измерений оптической толщи и PWV с помощью ИПАР-2 будет проводиться в районе г.Джуфудаг и на плато Шунудаг в апреле 2025 г.

Заключение

Описан способ и приведены первые результаты измерения радиояркостной температуры $T_{\rm b}$, пропускания атмосферы на волне 3 мм и PWV в местах PATAH-600, БТА и ЗТШ с помощью расположения двухканального атмосферного радиометра ИПАР-2. Получена высокая повторяемость результатов абсолютных радиометрических измерений *T*_b и хорошая сходимость измерений осажденного водяного атмосферы результатов пара радиометрическим способом и по данным реанализа Era-5.

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта РНФ N23-72-00041.

Литература

- Bubnov G.M. et al. Searching for new sites for THz observations in Eurasia // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2015. – T. 5. – №. 1. – C. 64–72.
- Хайкин В.Б., Шиховцев А.Ю., Шмагин В.Е., Лебедев М.К., Копылов Е.А., Лукин В.П., Ковадло П.Г. О проекте Евразийских субмиллиметровых телескопов (ESMT) и возможности применения адаптивной оптики для улучшения качества субММ изображений // Журнал Радиоэлектроники. 2022. №7. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.9

- Балега Ю.Ю., Батаев Д.К-С., Бубнов Г.М., Вдовин В.Ф., Землянуха П.М., Лолаев А.Б., Леснов И.В., Марухно А.С., Марухно Н.А., Муртазаев А.К., Хайкин В.Б., Худченко А.В. Прямые измерения атмосферного поглощения излучения субтерагерцового диапазона волн на Северном Кавказе // Доклады Российской академии наук. 2022. Т. 502, № 1. С. 5–9. DOI: https://doi.org/10.31857/S2686740022010023
- 4. Khaikin V. et al. On the Eurasian submillimeter telescopes project (ESMT) //2020
 7th All-Russian Microwave Conference (RMC). IEEE, 2020. C. 47-51.
- 5. Кисляков А.Г. // Радиотехника и электроника. 1968 Т. 13, № 7 С. 1–161
- Носов В.И. и др. Двухволновой измеритель радиопрозрачности атмосферы миллиметрового диапазона // Приборы и техника эксперимента. – 2016.
 – №. 3. – С. 49–56.
- Khaikin V.B. et al. A review of astroclimate conditions of possible locations for Eurasian SubMM Telescopes (ESMT). In the Proceedings of the VAK-2024, Nizhny Arkhyz, August 2024.
- Хайкин В.Б., Шиховцев А.Ю., Миронов А.П. Статистические характеристики осажденного водяного пара, оптической толщи и облачности в Северной части Евразии // Астрономический журнал, 2024а, том 101, № 2, с. 195–206.
- Ильин Г.Н. и др. Высокостабильный двухканальный радиометр водяного пара для измерений тропосферной задержки в реальном времени // Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2013. – №. 27. – С. 210–215.
- 10. Миронов А. Основы астрофотометрии. Практические основы фотометрии и спектрофотомерии звезд. Litres, 2022.
- Khaikin V.B., Karavaev D.M., Rybakov Y.V. Testing of atmospheric opacity during Sun observations with MSRT // 13th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, 2003. CriMiCo 2003. – IEEE, 2003. – C. 778–780.
- Cassiano M.M. et al. Precipitable water vapor and 212 GHz atmospheric optical depth correlation at El Leoncito site // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2018. – T. 168. – C. 32-36.

- 13. Kraus J.D.: Radio Astronomy (Cygnus-Quasar Books, Powell // Ohio. 1986.
- 14. Бубнов Г.М. и др. Согласованное определение интегральной влажности и эффективной оптической толщины атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн с использованием широкополосных радиометров // Известия вузов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62. – №. 12.
- 15. Fogarty W. Total atmospheric absorption at 22.2 GHz // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1975. T. 23. №. 3. C. 441–444.
- 16. Bevis M. et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 1992. – T. 97. – №. D14. – C. 15787-15801.
- Bubnov G. et al. Analysis of variations in factors of specific absorption of subterahertz waves in the earth's atmosphere // 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC). – IEEE, 2020. – C. 229-232.
- Шиховцев А.Ю., Хайкин В.Б., Ковадло П.Г., Baron P. Оптическая толща атмосферы для пика Терскол по данным реанализа Era-5. Оптика атмосферы и океана, N11, 2022. – С. 956–962.
- Espinoza D.C. et al. Sub-millimeter atmospheric opacity over "El Leoncito" site // 2020 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. – IEEE, 2020. – C. 1-4.
- Рыбаков Ю.В., Дроздов Д.В., Герасимов О.А. Гофрированные конические рупорно-линзовые антенны для самолетного СВЧ-влагомера // Всероссийские открытые Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. 2021. №. 1. С. 451–458.
- 21. Clark T.A., Irwin G. The Journal of the Royal Astr. Soc. of Canada. 67, N3 (522), 1973, p.142.
- 22. Бертенова О.Д., Никитиновская Н.А., Полякова Е.А. О спектральной прозрачности и содержании пара над Памиром. Труды ГГО N237.
- 23. Уилсон Т.Л., Рольфс К., Хюттемейстер С. Инструменты и методы радиоастрономии // М.: Физматлит, 2013. 568 с. 2012

- 24. Майорова Е.К. Исследование поглощения атмосферы и КПД антенны на миллиметровых волнах на радиотелескопе РАТАН-600. Сообщения САО, 1989, №.63, С.32-37.
- 25. Майорова Е.К., Трушкин С.А. Применение метода вертикальных разрезов атмосферы на РАТАН-600 // Радиотехника и электроника. 1987. №. 9. С. 1930–1937.
- 26. Столяров В.А. и др. Перспективы развития миллиметровой астрономии в САО РАН //Астрофизический бюллетень. 2024. Т. 79. №. 2. С. 331–349.
- 27. Khaikin V.B. et al. A study of the astroclimate in the Dagestan mountains Agul region and at the Ali Observatory in Tibet as possible locations for the Eurasian SubMM Telescopes (ESMT) // Proc. Sci. – 2002. – T. 425. – C. 72-79.

Для цитирования:

Хайкин В.Б., Домбек Е.М., Шиховцев А.Ю, Землянуха Павел М., Землянуха Петр М., Макоев Г.А., Назаров Г.П., Водзяновский Я.О., Худченко А.В. Первые результаты измерений пропускания атмосферы в местах расположения РАТАН-600, БТА и ЗТШ с помощью двухканального радиометра ИПАР-2 // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 5. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.14