

УДК 621.371.029.65

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ АТМОСФЕРЫ В ОКНАХ ПРОЗРАЧНОСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН ПО ЕЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЮ В ЛИНИИ H_2O $\lambda \sim 1,35$ см *

Ш. Д. Китай

Предложен метод оперативного определения оптической толщины τ ясной атмосферы в окнах прозрачности коротковолнового участка миллиметрового диапазона ($\lambda \simeq 1 \div 3$ мм) по измерениям радиояркостной температуры в линии H_2O $\lambda \sim 1,35$ см. Метод апробирован на основе автономных измерений радиохарактеристик атмосферы в указанных диапазонах волн, выполненных рядом авторов. Показано, что относительная среднеквадратичная точность прогноза τ составляет 5—25%.

1. Постановка задачи. В последнее время достигнуты значительные успехи в радиоастрономических исследованиях в коротковолновой части миллиметрового (ММ) и субмиллиметровом (СБММ) диапазонах волн [1,2]. В связи с этим возникает потребность в разработке методов, позволяющих оперативно и с достаточной точностью учитывать поглощающие свойства атмосферы Земли.

Оценки полного вертикального поглощения в толще атмосферы обычно выполняются по приземным значениям коэффициентов молекулярного поглощения и характеристическим высотам [3]. В работе [4] оптическая толщина рассчитывается с использованием статистической экстраполяции по высоте приземного значения коэффициента поглощения. Эти методы дают удовлетворительные результаты в сантиметровом (СМ) и длинноволновой части ММ ($\lambda \gtrsim 3$ мм) диапазонов волн. Однако точность этих методов уменьшается при укорочении длины волны.

В данной работе рассмотрены возможности определения оптической толщины безоблачной атмосферы в окнах прозрачности коротковолновой части миллиметрового диапазона ($\lambda \lesssim 3$ мм) по значениям яркостной температуры в области резонанса H_2O $\lambda \sim 1,35$ см. Физическим основанием метода является то, что поглощающие свойства атмосферы в указанных участках спектра в существенной степени определяются содержанием водяного пара и между значениями вертикального поглощения τ в сантиметровой и миллиметровой областях существует высокая корреляционная связь. В области $\lambda \sim 1,35$ см разработана высокочувствительная аппаратура и широко ведутся исследования влагосодержания атмосферы [5-7]. Таким образом, целью работы является прогноз оптических толщин атмосферы в миллиметровой области спектра по весьма доступным измерениям радиоизлучения в резонансе H_2O $\lambda \sim 1,35$ см.

Интерпретация измерений и статистический прогноз радиохарактеристик атмосферы обычно выполняются в рамках определенных моделей поглощения и излучения среды, при этом, разумеется, важна степень адекватности моделей. Ниже кратко рассмотрены распростра-

* Результаты данной работы частично были доложены на XIV Всесоюзной конференции по распространению радиоволн (г. Ленинград, 1984 г.) и представлены на IX Международной конференции по инфракрасным и миллиметровым волнам (Япония, 1984 г.).

ненные способы описания молекулярного поглощения в коротковолновой части миллиметрового диапазона.

2. Об описании поглощения миллиметрового радиоизлучения в земной атмосфере. Наиболее полные обзоры теоретических и экспериментальных результатов по молекулярному поглощению миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн содержатся в [8—11]. Из сведений, представленных в этих работах, следуют два хорошо известных вывода.

1) Ударная теория поглощения вполне удовлетворительно описывает молекулярное поглощение в резонансных областях, в том числе и в линии H_2O $\lambda \sim 1,35$ см.

2) Экспериментальные данные в окнах прозрачности миллиметрового диапазона превышают соответствующие теоретические результаты в 1,5—2 раза (при стандартных условиях на уровне моря).

Для устранения отмеченного расхождения обычно используются полуэмпирические формулы, учитывающие зависимость добавочного по отношению к теоретическому поглощения от атмосферных параметров.

В ряде работ (см., например, [12, 13]) обращено внимание на возможность поглощения микрорадиоволн димерными молекулами водяного пара, которое описывается квадратичной зависимостью коэффициента поглощения от абсолютной влажности. Соотношения, используемые в [14, 15], также содержат нелинейный член.

Приведем наиболее часто используемые выражения для дополнительного поглощения водяным паром в миллиметровой области спектра: Либе [14] —

$$\Delta\gamma_1 = (4,35 \cdot 10^{-8} \rho^2 + 8,13 \cdot 10^{-10} \rho P) (300/T)^{1,5\nu^2}, \quad (1)$$

Гот, Рейнфенштейн [16] —

$$\Delta\gamma_2 = 1,08 \cdot 10^{-6} \rho (P/1000) (300/T)^{2,1\nu^2}, \quad (2)$$

Райс, Эйд [16] —

$$\Delta\gamma_3 = 5,27 \cdot 10^{-5} \rho (P/850) (280/T)^{2,1\nu^2}, \quad (3)$$

Зражевский [17] —

$$\Delta\gamma_4 = \frac{1}{4,343} \exp \left[2,33 \ln \left(\frac{1}{\lambda} \right) - 4,343 \right] \left(\frac{P}{1013} \right)^2 \times \\ \times \left(\frac{293}{T} \right)^{3,3} \left(\frac{\rho T}{2,167 P} \right) \left[1 + \frac{(\sigma_2 - 1) \rho T}{216,7 P} \right] [1 + 0,01 (\sigma_2 - 1)]^{-1}, \quad (4)$$

аппроксимационная формула [18] коэффициента поглощения димеров согласно [12] —

$$\Delta\gamma_5 = \frac{K_\lambda}{4,343} \rho^2 \left(\frac{318}{T} \right)^{11,7}. \quad (5)$$

В (1)—(5) $\Delta\gamma_i$ ($i=1,5$) выражены в Нп/км, атмосферное давление P — в мбар, абсолютная влажность ρ — в г/м³, частота ν — в ГГц, T — абсолютная температура, K_λ — затабулированная функция длины волны, σ_2 — корректирующий параметр, эффективно учитывающий экспериментальное превышение поглощения.

Оценки показали, что в коротковолновом участке миллиметрового диапазона поправки (3), (4) дают близкие результаты, использование формулы (1) приводит к несколько большим величинам, а поглощение в димерах на порядок меньше. Так, для $\nu = 200$ ГГц $\Delta\gamma_1 = 0,34$ Нп/км, $\Delta\gamma_2 = 0,32$ Нп/км, $\Delta\gamma_3 = \Delta\gamma_4 = 0,26$ Нп/км, $\Delta\gamma_5 = 0,04$ Нп/км при стандартных атмосферных условиях ($P = 1000$ мбар, $T = 300$ К, $\rho = 7,5$ г/м³).

В дальнейшем мы используем описание молекулярного поглощения в кислороде и мономерах водяного пара по квантово-механическим формулам [8] с привлечением полуэмпирического соотношения (4).

3. Методика исследований. Измерения вертикального поглощения и характеристик радиоизлучения атмосферы в области резонанса H_2O $\lambda \sim 1,35$ см и в окнах прозрачности миллиметрового диапазона выполнялись независимо рядом авторов (см., например, [15, 19, 20]). В работе [21] проведены синхронные измерения оптической толщины атмосферы на волнах $\lambda \approx 1,35$ см и $\lambda \approx 2 \div 3$ мм. Там же содержатся

Таблица 1

Теоретические, прогнозируемые и экспериментальные значения оптической толщины атмосферы для ряда синхронных измерений на длинах волн $\lambda = 3,34$ и $2,07$ мм

Дата	$\lambda = 3,34$ мм			
	τ^r , Нп	τ^u , Нп	τ^e , Нп	$\delta\tau^e$, %
22.01.79	0,110	0,13	0,119	8
24.01.79	0,097	0,09	0,106	9
16.02.79	0,093	0,08	0,103	11
01.03.79	0,112	0,11	0,129	15
04.04.79	0,105	0,10	0,104	1
16.05.79	0,216	0,18	0,256	19
21.05.79	0,124	0,12	0,141	14
22.05.79	0,127	0,12	0,148	17
25.06.79	0,173	0,19	0,206	19

$\delta\tau^e$, %	$\lambda = 2,07$ мм				
	τ^r , Нп	τ^u , Нп	τ^e , Нп	$\delta\tau^e$, %	$\delta\tau^e$, %
18	0,191	0,24	0,207	9	26
7	0,137	0,14	0,160	17	2
14	0,131	0,17	0,150	15	30
2	0,207	0,21	0,242	17	1
5	0,185	0,21	0,18	3	14
17	0,597	0,71	0,662	11	19
3	0,266	0,29	0,295	11	9
6	0,273	0,30	0,320	17	10
10	0,442	0,49	0,503	14	11

сведения о сравнении теоретических и экспериментальных данных по поглощению и приведены коэффициенты корреляции между оптическими толщинами в указанных областях спектра. Однако конкретные результаты синхронных измерений τ в работе [21] не приводятся. Поэтому в данной работе применялось численное моделирование комплексного радиофизического эксперимента вблизи резонанса H_2O $\lambda \sim 1,35$ см и в коротковолновой части миллиметрового диапазона с учетом возможных ошибок измерений. Апробация результатов осуществлялась путем сравнения вычисленных значений яркостных температур атмосферы в области $\lambda \sim 1,35$ см с измерениями, выполненными Плечковым на загородном полигоне НИРФИ «Зименки» [20], а также теоретических величин вертикального поглощения на волнах $\lambda = 2,07$ и $3,34$ мм с измерениями Федосеева и Кузнецова в г. Горьком [19]. Теоретические значения

$$\tau(\lambda, \theta) = \frac{1}{\cos \theta} \int_0^H \gamma(\lambda, h) dh; \quad (6)$$

$$T_{\pi}(\lambda, \theta) = \frac{1}{\cos \theta} \int_0^H T(h) \gamma(\lambda_0, h) \exp\left(-\frac{1}{\cos \theta} \int_0^h \gamma(\lambda_0, h') dh'\right) dh \quad (7)$$

вычислялись по результатам аэрологического зондирования атмосферы, совпадающего по времени с радиометрическими измерениями*. В (6), (7) γ — суммарный коэффициент поглощения в водяном паре и кислороде.

Сравнение теоретических и экспериментальных (для ряда наблюдений) величин τ в миллиметровом диапазоне волн проведено в табл. 1

В исследованиях зависимости $\tau(\lambda, \theta) = f [T_{\text{я}}(\lambda_0, \theta)]$ использовались линейная и квадратичная функции:

$$\tau(\lambda, \theta) = B_1(\lambda, \theta) T_{\text{я}}(\lambda_0, \theta) + C_1(\lambda, \theta); \quad (8)$$

$$\tau(\lambda, \theta) = A_2(\lambda, \theta) T_{\text{я}}^2(\lambda_0, \theta) + B_2(\lambda, \theta) T_{\text{я}}(\lambda_0, \theta) + C_2(\lambda, \theta). \quad (9)$$

В качестве опорной в резонансной области H_2O выбиралась длина волны $\lambda_0 = 1,3$ см, на которой вариации яркостной температуры определяются вариациями полной массы водяного пара и практически не зависят от высотного распределения влажности. Зависимости (8), (9) рассматривались для окон прозрачности в диапазоне $\lambda \approx 1 \div 3$ мм при зенитных углах $\theta = 0 \div 60^\circ$.

В рамках выбранной модели поглощения методом наименьших квадратов получены наборы регрессионных коэффициентов (A_i, B_i, C_i) для летних и зимних условий года в центральной части ЕТ СССР. Соотношения (8), (9) позволяют прогнозировать оптическую толщину атмосферы в миллиметровых окнах прозрачности, если известны радиояркостные температуры вблизи $\lambda \sim 1,35$ см.

4. Основные результаты. Анализ (8), (9) при различных погрешностях радиометрических измерений $\Delta T_p = 0,5 \div 1,5$ К позволил сделать следующие выводы.

1) Использование квадратичной аппроксимации уменьшает ошибки прогноза на 1—3% по сравнению с линейной.

2) Увеличение точности измерений яркостных температур от 1,5 К до 0,5 К ведет к уменьшению погрешностей определения τ на 2—3%.

Обычно наблюдается сезонная универсальность регрессионных коэффициентов, связывающих элементы метеоструктуры атмосферы с ее радиохарактеристиками, а также различные параметры теплового радиоизлучения атмосферы в близких спектральных интервалах. Особенность данной задачи заключается в том, что регрессионные соотношения устанавливаются между радиохарактеристиками, весьма разнесенными по диапазону. И, как следствие, коэффициенты регрессии проявляют заметную сезонную зависимость зимой и летом. Так, использование летнего набора для обработки результатов измерений яркостных температур, проведенных зимой, приводит к погрешностям до ~40%. В то же время коэффициенты регрессии для переходных сезонов обладают большей стабильностью.

В табл. 1 приведены примеры прогноза поглощения ($\tau^{\text{п}}$) на длинах волн $\lambda = 3,34$ и $2,07$ мм в те дни, когда выполнялись измерения этих же величин ($\tau^{\text{з}}$), а также соответствующие теоретические значения ($\tau^{\text{т}}$). Величины $\tau^{\text{п}}$ определялись по регрессионной формуле (9) при ошибке радиометрических измерений $\Delta T_p = 1$ К, $\delta\tau^{\text{п}}$ и $\delta\tau^{\text{з}}$ — относительные погрешности прогноза и измерений.

В табл. 2 представлены статистические сведения по исследуемым характеристикам поглощения: средние значения ($\overline{\tau^{\text{т}}}, \overline{\tau^{\text{з}}}, \overline{\tau^{\text{п}}}$) и дисперсии

$$\left(\sigma_{\tau^{\text{т}}} = \left(\frac{\sum (\tau^{\text{т}} - \overline{\tau^{\text{т}}})^2}{N-1} \right)^{1/2}, \quad \sigma_{\tau^{\text{з}}} = \left(\frac{\sum (\tau^{\text{з}} - \overline{\tau^{\text{з}}})^2}{N-1} \right)^{1/2}, \quad \sigma_{\tau^{\text{п}}} = \left(\frac{\sum (\tau^{\text{т}} - \tau^{\text{п}})^2}{N-1} \right)^{1/2} \right).$$

* Соотношения (6), (7) записаны в приближении плоскостной атмосферы, которое справедливо в рассмотренном диапазоне частот и углов.

Значения $\sigma_{\tau}^{\tau, \Pi}$ характеризуют степень адекватности выбранной модели поглощения относительно имеющегося эксперимента, а величины $\sigma_{\tau}^{\tau, \Pi}$ — точность прогноза в сравнении с использованной моделью поглощения.

Таблица 2

Средние сезонные значения и дисперсии поглощения на $\lambda = 3,34$ и $2,07$ мм

Величина (Нп)	$\lambda = 3,34$ мм		$\lambda = 2,07$ мм	
	зима	лето	зима	лето
$\overline{\tau^{\tau}}$	0,11	0,16	0,19	0,39
$\overline{\tau^{\Pi}}$	0,11	0,16	0,22	0,43
$\overline{\tau^{\Pi}}$	0,13	0,19	0,23	0,44
σ_{τ}^{τ}	0,017	0,052	0,063	0,193
$\sigma_{\tau}^{\tau, \Pi}$	0,016	0,017	0,052	0,052
$\sigma_{\tau}^{\tau, \Pi}$	0,017	0,038	0,041	0,075

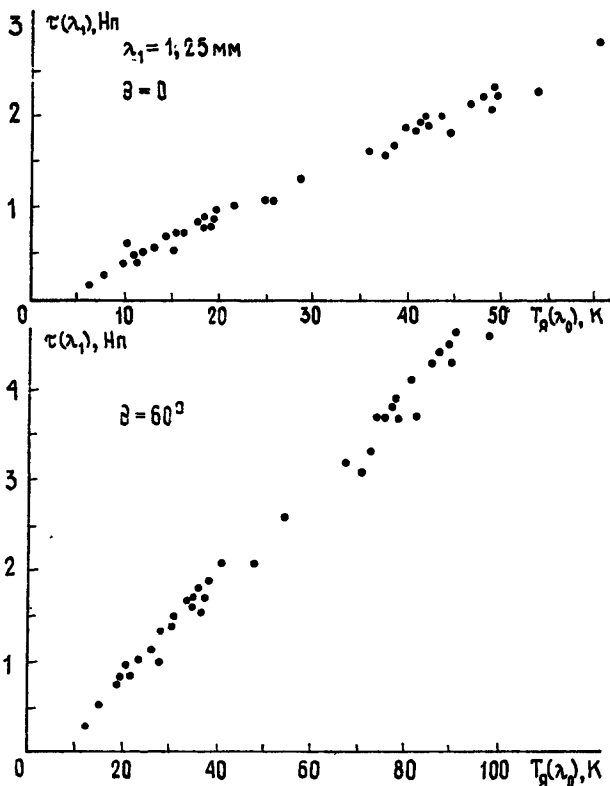


Рис. 1. Оптические толщины на длине волны $\lambda_1 = 1,25$ мм и яркостные температуры $T_{\text{я}}$ ($\lambda_0 = 1,3$ см) для зимних и летних данных аэрологического зондирования (нижняя и верхняя группы точек соответственно) при зенитных углах $\theta = 0^\circ$ и 60° .

Из табл. 2 следует, что прогноз с помощью полученных регрессионных соотношений позволяет примерно в 1,5—2 раза уменьшить естественную климатическую неопределенность поглощения в атмосфере: летом на обеих рассмотренных длинах волн, зимой — в двухмиллиметровом окне прозрачности. С помощью прямых измерений по-

глощение в летних условиях определяется с несколько лучшей точностью, чем по прогнозу ($\sigma_{\tau}^{\text{л}} < \sigma_{\tau}^{\text{з}}$). Однако в зимних условиях величины $\sigma_{\tau}^{\text{л}}$, $\sigma_{\tau}^{\text{з}}$ и $\sigma_{\tau}^{\text{г}}$ близки между собой.

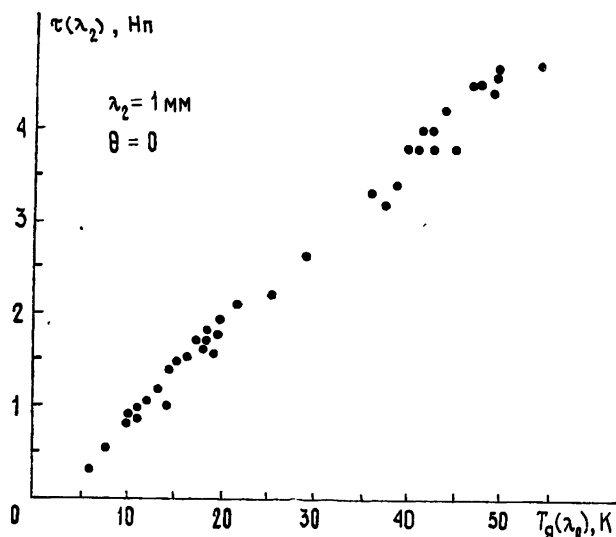


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для $\lambda_2=1$ мм при зенитном угле $\theta = 0^\circ$.

Нам представляется возможным расширить область применимости обсуждаемой методики до значений оптических толщин порядка 1—2, что соответствует более коротким длинам волн.

На рис. 1, 2 нанесены расчетные значения оптической толщины атмосферы Земли на длинах волн $\lambda_1=1,25$ и $\lambda_2=1$ мм и величины яркостных температур $T_{\text{я}}$ ($\lambda_0 = 1,3$ см) для зимнего и летнего ансамблей аэрологических данных. Из диаграмм рассеяния видно, что для рассматриваемых окон прозрачности вблизи 1 мм также можно установить функциональные зависимости типа (8), (9). Численные эксперименты по прогнозированию поглощения на длине волны λ_1 проводились летом и зимой, а на λ_2 — зимой (в зените $\tau^{\text{г}}$ составляют 1,88; 0,64 и 1,3 Нп/км соответственно). Установлено, что абсолютные погрешности прогноза поглощения в области $\lambda \sim 1$ мм близки или незначительно превышают аналогичные величины в окне прозрачности $\lambda \sim 2$ мм, однако общая величина поглощения при $\lambda \sim 1$ мм значительно больше, поэтому относительные ошибки прогноза в коротковолновом участке составляют только 5% летом и 10% зимой, что в 4—5 раз меньше относительных климатических вариаций оптической толщины атмосферы.

Таблица 3

Прогноз поглощения на длинах волн $\lambda_1 = 1,25$ мм и $\lambda_2 = 1$ мм по измерениям радиояркостных температур $T_{\text{я}}$ ($\lambda_0 = 1,3$ см)

Дата	θ , град	$T_{\text{я}}$, К	λ , мм	$\tau^{\text{г}}$, Нп	$\tau^{\text{л}}$, Нп	$\delta\tau^{\text{л}}$, %
25.07.79	0	35,4	1,25	1,501	1,57	5
27.07.79	0	36,5	1,25	1,512	1,62	7
30.10.79	0	12	1,25	0,430	0,42	5
30.10.79			1,0	0,865	0,83	4
30.10.79	60	23	1,25	0,860	0,79	8
30.10.79			1,0	1,731	1,60	7

Результаты численных экспериментов подтверждаются прогнозом τ по измеренным значениям яркостных температур $T_{\text{я}}$ на длине волны $\lambda_0 = 1,3$ см [20], примеры обработки которых приведены в табл. 3.

Полученные результаты характеризуют возможности прогноза оптических толщин ясной атмосферы в коротковолновом участке миллиметрового диапазона по измерениям радиоярких температур в области резонанса H_2O $\lambda \sim 1,35$ см.

Автор благодарит А. П. Наумова за постановку задачи и обсуждение результатов, Л. И. Федосеева, И. В. Кузнецова и В. М. Плечкова за подробное ознакомление с экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кисляков А. Г.—УФН, 1970, 101, № 4, с. 607; Препринт ИПФ АН СССР № 108.—Горький, 1984.
2. Sherwood W. A., Schults G. V., Kreysa E.—Nature, 1981, 291, № 5813, p. 301.
3. Жевакин С. А., Троицкий В. С.—Радиотехника и электроника, 1959, 4, № 1, с. 21.
4. Наумов А. П., Зиничева М. Б.—Радиотехника и электроника, 1980, 25, № 5, с. 919.
5. Гурвич А. С., Ершов А. Т., Наумов А. П., Плечков В. М.—Метеорология и гидрология, 1972, № 5, с. 22.
6. Горелик А. Г., Калашников В. В., Райкова Л. С., Фролов Ю. А.—Изв. АН СССР. Сер. ФАО, 1973, 9, № 9, с. 928.
7. Щужин Г. Г., Бобылев Л. П., Вьюгинов В. Н. и др.—Труды ГГО, 1982, вып. 451, с. 18.
8. Жевакин С. А., Наумов А. П.—Изв. вузов.—Радиофизика, 1967, 10, № 9—10, с. 1213.
9. Соколов А. В. Итоги науки и техники (Радиотехника).—М.: ВИНТИ, 1974, вып. 5, с. 5.
10. Андреев Г. А., Зражевский А. Ю., Кутуза Б. Г. и др. В кн.: Проблемы современной радиотехники и электроники.—М.: Наука, 1980, с. 139.
11. Furashov N. I., Katkov V. Yu., Ryadov V. Ya.—Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 1984, 5, № 7, p. 971.
12. Викторова А. А., Жевакин С. А.—ДАН СССР, 1970, 194, № 3, с. 540.
13. Zhevakina S. A., Ryadov V. Ya., Furashov N. I. Paper presented at the Anglo-Soviet Seminar on atmospheric propagation at millimetre and submillimetre wavelengths.—M.: Institute of Radioengineering and Electronics, 1977, p. A1.
14. Liebe H. J.—Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 1984, 5, № 2, p. 207.
15. Manabe T., Furuhashi Y., Ihara T. et al.—Ninth Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, 1984, p. 465.
16. Zammit C. C., Ade P. A. R.—Nature, 1981, 293, № 5833, p. 550.
17. Зражевский А. Ю.—Радиотехника и электроника, 1976, 21, № 5, с. 951.
18. Борин В. П., Наумов А. П.—Радиотехника и электроника, 1979, 24, № 1, с. 44.
19. Fedoseev L. I., Kuznetsov I. V.—Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 1984, 5, № 7, p. 1027.
20. Gaikovitch K. P., Markina N. N., Naumov A. P. et al.—Int. J. Remote Sensing, 1983, 4, № 2, p. 419.
21. Gibbins C. J., Wrench C. L., Croom D. L.—Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 1984, 5, № 11, p. 1443.

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию
14 ноября 1985 г.

DEFINITION OF THE ATMOSPHERE OPTICAL DEPTH IN TRANSPARENCY WINDOWS OF THE MILLIMETER WAVE RANGE OVER ITS RADIATION IN H_2O LINE $\lambda \sim 1.35$ cm

Sh. D. Kitaj

A method is suggested for the operative definition of the optical depth τ of the clear atmosphere in transparency windows of the short wave part of the millimeter range ($\lambda \approx 1 \div 3$ mm) over measurements of radio brightness temperature in H_2O line $\lambda \sim 1.35$ cm. The method is tested on the basis of autonomous measurements of the atmosphere radio characteristics in the given wave ranges being made by a number of authors. It is shown that the relative rms accuracy of the prognostic τ amounts 5—25%.