

УДК 621.371.22 : 525.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН В ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЕ

В. Ф. Заболотный, И. И. Зинченко, И. А. Исхаков, А. В. Соколов, Е. В. Сухонин, В. И. Чернышев

Приведены результаты двухлетних измерений методом наклонного зондирования атмосферы ослабления излучения на длинах волн $\lambda = 4,1; 4,0; 3,5; 2,0; 1,3; 1,25$ и $0,73$ мм в облаках разных форм. Установлено, что в облаках одних и тех же форм ослабление значительно больше в теплое полугодие, чем в холодное. Во всех формах облаков, за исключением кучево-дождевых, мощных кучевых и слоистых туманообразных, среднее вертикальное ослабление в облаках на $\lambda > 1$ мм меньше молекулярного поглощения.

Исследование распространения миллиметрового излучения сквозь всю толщу земной атмосферы является актуальной задачей. В связи с быстрым освоением миллиметрового диапазона в ближайшее время понадобятся данные о поглощающих свойствах атмосферы, которые будут полезны при проектировании линий связи, выборе режимов работы радиотелескопов, исследовании природных ресурсов и т. д.

В настоящее время известно достаточно большое число экспериментальных работ по изучению вертикального молекулярного поглощения миллиметровых волн (см. обзор [1]). Результаты измерений показывают, что в окнах прозрачности атмосферы поглощение в кислороде и водяном паре невелико. Вертикальное поглощение в чистой атмосфере эквивалентно поглощению на приземной трассе длиной порядка 2 км. Однако наличие облачности вызывает дополнительное ослабление на наклонных трассах, которое на коротких волнах может оказаться значительным.

Исследованиям распространения коротких миллиметровых волн в облаках и других гидрометеорах посвящено небольшое число работ. Теоретические оценки ослабления в облаках представляют большие трудности, поскольку физические и микрофизические характеристики облаков испытывают сильные временные и пространственные изменения. В экспериментальных работах, где исследовалось ослабление в облаках на $\lambda = 4,1$ мм [2], $\lambda \approx 3,3$ мм [3, 4] и $\lambda = 1,3$ мм [5], измерения проводились в течение сравнительно короткого периода наблюдений.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование на нескольких длинах волн ослабления в облаках разных форм во все сезоны года.

Аппаратура и методика измерений. Измерения ослабления в облаках проводились в режиме наклонного зондирования атмосферы на волнах $\lambda = 4,1; 4,0; 3,5; 2,0; 1,3; 1,25; 0,73$ мм. Время наблюдений составило более двух лет во все сезоны 1976—1978 гг. Общее количество дней наблюдений ~ 150 . Основные характеристики радиометров, время и место проведения экспериментов приведены в табл. 1.

При измерениях ослабления на $\lambda = 4,1$ мм и $\lambda_{эфф} = 1,3$ мм приемной антенной служил рупор прямоугольного сечения, а сканирование по зенитному углу осуществлялось вращением плоского металлического отражателя, установленного перед антенной. На волне $\lambda = 4,1$ мм ис-

гользовался супергетеродинный приемник [6]. В радиометре прямого усиления ($\lambda_{эфф} = 1,3$ мм) эффективная длина волны определялась с учетом спектральных характеристик детектора, фильтров, излучения и поглощения атмосферы*. Детектором служил кристалл из *n*-InSb, работающий при температуре жидкого гелия. Фильтрация коротковолнового излучения ($\lambda < 0,4$ мм) осуществлялась пленкой и профилированной в виде эшелетта линзой, изготовленных из черного полиэтилена.

Таблица 1

Характеристики радиометров, сезон и район измерений

Тип радиометра	Длина волны, мм	Чувствительность при $\tau = 1$ с	Ширина диаграммы направленности антенны	Сезон года	Район измерений
Супергетеродинный	4,1	4 К при $\Delta f = 30$ МГц	$10^\circ \times 2^\circ$	Зима, осень, весна, лето	Горьковская обл.
Супергетеродинный	4,0; 3,5	2 К при $\Delta f = 80$ МГц	45"	Весна, лето, осень	Крым, г. Симеиз
С интерферометром Фабри — Перо	2,0, 1,25	0,1 К	$1',8 \times 1',3$	Лето	Крым, г. Симеиз
С эшелеттным монохроматором	1,25; 0,73	0,3 К	10'	Весна, лето, зима	Моск. обл., Кавказ, гора Арагац
Широкополосный	1,3	0,1 К	$30^\circ \times 3^\circ$	Лето	Горьковская обл.

Супергетеродинный приемник на $\lambda = 4,0$ и $3,5$ мм [7] и радиометр с интерферометром Фабри — Перо на $\lambda = 2,0$ и $1,25$ мм [8] были установлены на радиотелескопе РТ-22 КраО АН СССР. У радиометра с интерферометром Фабри — Перо, имевшего добротность, равную 5, детектором служил кристалл из *n*-InSb.

Ослабление в облаках на волнах $1,25$ мм и $0,73$ мм измерялось соответственно под Москвой и на Кавказе на высоте 3250 м. Телескоп состоял из метровой параболической антенны диаметром 1 м, эшелеттного монохроматора с разрешением 1 см⁻¹ и детектора из *n*-InSb [9].

В процессе проведения всех измерений стабильность работы приемо-регистрирующей аппаратуры контролировалась с помощью эталонных черных тел, температура которых могла быть изменена в широких пределах. Черные тела применялись также для калибровки при определении величин яркостных температур атмосферы. Эти эталонные излучатели периодически устанавливались перед облучателем антенны и перекрывали всю его диаграмму направленности.

Во время радиометрических измерений ослабления регулярно регистрировались температура, давление и абсолютная влажность воздуха у поверхности Земли. Форма облаков определялась визуально с помощью атласа облаков [10].

Исследование ослабления в облачной атмосфере по ее собственному излучению осуществлялось на всех выше перечисленных длинах волн. Наблюдения по радиоизлучению Солнца проводились на $\lambda = 4,0$; $3,5$; $2,0$; $1,25$ мм. Второй метод наиболее точен. Однако для его применения необходимо иметь систему, с помощью которой антенна могла бы

* $\lambda_{эфф}$ определялась из соотношения $\int_{\lambda_1}^{\lambda_{эфф}} f(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_{эфф}}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda$, где $f(\lambda)$ и $(\lambda_1 - \lambda_2)$ — соответственно функция пропускания и полоса пропускания.

следить за Солнцем. Записывая сигналы, когда облака отсутствуют (I_1) и закрывают Солнце (I_2), можно получить ослабление в облаке из выражения

$$\Gamma_{об} (\partial Б) = 4,34 \ln \frac{I_1}{I_2}. \quad (1)$$

При наблюдениях собственного излучения атмосферы может быть использовано несколько методик измерений. В случае сплошной однородной облачности полное вертикальное ослабление Γ , обусловленное облачным и молекулярным поглощением, измерялось методом вертикальных разрезов неба. При этом

$$\Gamma (\partial Б) = \frac{4,34}{Sc \theta_2 - Sc \theta_1} \ln \frac{T_0 - T_1}{T_0 - T_2}, \quad (2)$$

где T_0 — яркостная температура опорной области, равная температуре воздуха у поверхности Земли; T_1 и T_2 — яркостные температуры неба при зенитных углах θ_1 и θ_2 . Ослабление в облаках $\Gamma_{об}$ находилось вычитанием из полного ослабления Γ молекулярного поглощения Γ_m . Необходимо отметить, что этот метод предполагает выполнение закона косинуса для ослабления на наклонных трассах в реальной атмосфере. Однако это не всегда имеет место, даже когда по зрительному восприятию облака кажутся сплошными и однородными. Поэтому перед измерением ослабления обязательно проверялось, является ли зависимость $\ln(T/T_{\theta=0}) = f(Sc \theta)$ линейной. Время зондирования атмосферы при фиксированном θ должно быть много больше максимально наблюдаемого временного масштаба флуктуации излучения облачной атмосферы.

В тех случаях, когда при сплошной облачности метод разрезов был неприменим, использовался другой метод. Измерялась яркостная температура облаков $T_{я}$ при фиксированном θ . Ослабление во всей толще атмосферы в направлении луча антенны определялось из выражения

$$\Gamma (\partial Б) = 4,34 \ln \frac{T_0}{T_0 - T_{я}}, \quad (3)$$

где T_0 — температура воздуха у поверхности Земли.

Ослабление в облаке $\Gamma_{об}$, как и в первом случае, находилось вычитанием из полного вертикального ослабления Γ молекулярного поглощения Γ_m .

В основу этой методики измерения ослабления легли следующие рассуждения. Известно, что в случае чистой атмосферы ее яркостная температура равна [11]

$$T_{я} = T_{ср}(1 - e^{-\Gamma_m}), \quad (4)$$

где $T_{ср}$ — средняя температура чистой атмосферы. В работе [12] показано (см. рис. 6), что $T_{ср}$ и температура воздуха в приземном слое атмосферы T_0 мало отличаются друг от друга ($T_{ср}/T_0 > 0,9$). (При возрастании Γ_m отношение $T_{ср}/T_0$ стремится к 1.)

В случае облачной атмосферы ее яркостная температура $T_{я.об}$ может быть представлена в виде

$$T_{я.об} = T_{ср.об} [1 - e^{-(\Gamma_m + \Gamma_{об})}], \quad (5)$$

где $T_{ср.об}$ — средняя температура атмосферы при наличии облаков. Так как $T_{ср.об} > T_{ср}$, то $T_{ср.об}$ еще более близка к T_0 . Хотя $T_{ср}$ и $T_{ср.об}$ несколько отличаются друг от друга и от T_0 , тем не менее с ошибкой, не превышающей нескольких процентов, можно допустить, что $T_{ср} \approx T_{ср.об} \approx T_0$. Тогда из (5) можно легко получить формулу (3).

При разорванной облачности (облака разделены промежутками чистого неба) излучение регистрировалось попеременно от участков чистого неба $T_{я1}$ и облаков $T_{я2}$ при фиксированном θ . При этом ослабление в облаке в направлении оси антенны определялось по формуле (6), которая легко получается из выражений (4) и (5):

$$\Gamma_{об} (\text{дБ}) = 4,34 \ln \frac{T_0 - T_{я1}}{T_0 - T_{я2}}. \quad (6)$$

При измерениях в Крыму в качестве опорной области с яркостной температурой, равной T_0 , служил склон горы, поросший лесом; при других измерениях — деревянный щит, установленный рядом с антенной.

Результаты измерений. Величины ослабления в облаках, полученные при разных зенитных углах θ , умножением на $\cos \theta$ приводились к вертикальному ослаблению. При этом предполагалась горизонтальная стратификация облаков.

Как уже отмечалось выше, в случаях сплошной облачности из полного ослабления в облачной атмосфере, полученного по (2) и (3), вычиталось молекулярное поглощение, обусловленное кислородом и водяным паром. Молекулярное поглощение обычно измерялось до и после появления облаков. Если метеоусловия в безоблачную погоду и при наличии облаков не совпадали, то молекулярное поглощение находилось для $\lambda = 4,1$ мм по эмпирической формуле (7) работы [13], а для $\lambda = 1,25$ и $0,73$ мм по графическим зависимостям вертикального поглощения от абсолютной влажности в приземном слое воздуха [14]. Эти зависимости, приведенные в [14], были получены в течение длительного времени наблюдения как по излучению Солнца, так и по собственному излучению атмосферы.

Таблица 2

Среднее $\Gamma_{ср}$ (дБ) и максимальное Γ_{max} (дБ) ослабления в облаках на волнах $\lambda = 4,0 \div 0,73$ мм

Форма облаков	Время года	$\lambda = 4,0$ и $4,1$ мм		$\lambda = 3,5$ мм		$\lambda = 2,0$ мм		$\lambda = 1,25$ и $1,3$ мм		$\lambda = 0,73$ мм	
		$\Gamma_{ср}$	Γ_{max}	$\Gamma_{ср}$	Γ_{max}	$\Gamma_{ср}$	Γ_{max}	$\Gamma_{ср}$	Γ_{max}	$\Gamma_{ср}$	Γ_{max}
Ac	Зима	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Лето	0,2	0,7	0,2	0,3	0,1	0,2	0,4	0,9	0,6	2,1
As	Зима	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Лето	0,3	0,7	0,3	0,8	—	—	0,5	0,7	1,0	2,4
Sc	Зима	0,2	0,3	—	—	—	—	—	—	—	—
	Лето	1,2	3,0	0,4	1,6	—	—	—	—	—	—
St	Зима	0,4	0,8	—	—	—	—	0,1	0,4	—	—
	Лето	2,5	3,5	0,6	2,3	1,9	3,2	3,7	5,2	—	—
Cu hum	Зима	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Лето	0,3	1,1	—	—	—	—	0,7	1,7	—	—
Cu med	Зима	0,2	0,8	—	—	—	—	0,2	0,6	—	—
	Лето	1,5	2,7	0,6	2,5	—	—	1,8	5,5	6,7	10
Cu cong	Зима	0,4	0,8	—	—	—	—	—	—	—	—
	Лето	1,7	5	1,5	3,5	3,3	9,1	8,7	14,1	11,6	27
Cb	Зима	—	—	—	—	—	—	1,5	2,6	—	—
	Лето	3,7	7,0	3,4	8,2	—	—	11,0	18,9	—	—

Результаты измерений вертикального ослабления, полученные для широкого класса облаков в разные времена года в диапазоне $0,73$ — $4,1$ мм, приведены в табл. 2. При наличии облачности сигнал испытывает непрерывные флуктуации. Случайные его отклонения могут продолжаться от нескольких секунд до нескольких минут и превосходить сред-

ние значения примерно в 2—3 раза. Из табл. 2 видно, что максимальное ослабление имеет место в кучево-дождевых облаках; при этом на $\lambda = 4,1$ мм оно достигает 7 дБ, на $\lambda = 1,25$ мм — 19 дБ. Среди всех форм облаков, не дающих осадков, наибольшее ослабление происходит в облаках вертикального развития. Иногда в случае кучевых облаков наблюдались значительные вариации ослабления. Наибольшие зарегистрированные значения ослабления в мощных кучевых облаках на $\lambda = 4,1$; 2 и 1,25 мм равны соответственно 5; 9 и 14 дБ. Ослабление в средних кучевых *Cu med* и плоских кучевых *Cu hum* облаках значительно меньше, так на $\lambda = 4,1$ мм оно равно соответственно 2,7 дБ и 1,1 дБ. В слоисто-кучевых *Sc* и слоистых *St* облаках максимальные значения ослабления на $\lambda = 4,1$ мм в летнее время могут быть 2—3 дБ. В облаках этих форм вариации ослабления меньше, чем в облаках типа *Cu*. Облака среднего яруса *As* и *Ac* мало влияют на ослабление миллиметрового излучения. В летнее время на $\lambda = 4,1 \div 1,25$ мм ослабление находится в пределах 0,2—0,9 дБ. На волне 0,73 мм в высокослоистых облаках *As* было зарегистрировано ослабление 2,4 дБ. При наблюдениях было замечено, что в облаках туманообразного непросвечивающего вида одной и той же формы ослабление больше, чем в облаках волнистого или кучевообразного вида. Это можно попытаться объяснить тем, что из таких облаков иногда выпадают слабые осадки, не достигающие Земли (также над слоем туманообразных облаков могут находиться более мощные облака). Приращения радиояркостных температур при наблюдении облаков верхнего яруса даже на коротких волнах не превышали флуктуационного порога чувствительности радиометра. Поэтому измерение ослабления в перистых облаках всех форм не представлялось возможным.

Из табл. 2 видно, что поглощение в облаках сильно зависит от длины волны излучения. Для одних и тех же форм облаков ослабление на $\lambda = 1,25$ мм в 2—3 больше, чем на $\lambda = 4,1$ мм. Подтверждением этому явились результаты одновременных измерений на $\lambda = 4,1$ мм и $\lambda_{эфф} = 1,3$ мм.

Результаты экспериментов показывают, что зимой ослабление в облаках значительно меньше, чем летом. Прежде всего это связано с тем, что зимой почти не бывает мощные облака. Было также установлено, что в облаках одной и той же формы ослабление в холодные дни значительно меньше, чем в теплые. Особенно это было заметно во время длительных измерений в осенние и весенние сезоны года, когда за короткий промежуток времени температура резко меняется. Такие измерения были проведены на волнах $\lambda = 4,1$ и 1,25 мм. В тех случаях, когда температура воздуха у земной поверхности $t \approx 0^\circ\text{C}$, ослабление в 3—10 раз меньше, чем при $t > 15^\circ\text{C}$. В летнее и зимнее время ослабление отличается примерно во столько же раз. Такую разницу в поглощении, по-видимому, можно объяснить разным агрегатным состоянием воды в облаках и соотношением объемных содержаний капель воды и кристаллов льда.

Во всех случаях, за исключением кучево-дождевых, мощных кучевых и слоистых туманообразных облаков величины среднего вертикального ослабления в облаках на $\lambda > 1,25$ мм меньше величин молекулярного поглощения, только в облаках вертикального развития на $\lambda = 1,25$ мм среднее ослабление сравнимо с молекулярным. Имея полученные данные для облаков разных форм и учитывая спектр молекулярного поглощения в чистой атмосфере, можно оценить полное вертикальное ослабление в облачной атмосфере на волнах 1—4 мм.

Авторы выражают благодарность А. Г. Кислякову за помощь, при организации и проведении измерений и обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кисляков А. Г., Станкевич К. С — Изв. вузов — Радиофизика, 1967, 10, № 9—10, с. 1244.
2. Башаринов А. Е., Кутуза Б. Г — Труды ГГО, 1968, вып. 222, с. 100.
3. Lo Lai-Lun, Fannin B. M., Straiton A. W — IEEE Trans Ant. Propag, 1975, AP-23, № 6, p. 782.
4. Wrixon G. T. — Bell. Syst. Tech J, 1971, 5, № 1, p. 103.
5. Wrixon G. T. Proc. 4-th Eur. Microwave Conf. Montreux — Surbitain: 1974, s. a 222.
6. Кисляков А. Г. — УФН, 1970, 101, № 4, с. 607.
7. Буров А. Б. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1976, 19, № 12, с. 1795.
8. Афонченков Н. Г. и др. — Астроном журн., 1976, 53, № 1, с. 178.
9. Варданян А. С. и др. — Астроном. журн., 1972, 49, № 5, с. 986
10. Атлас облаков — Л: Гидрометеоздат, 1957.
11. Жевакин С. А. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1958, 1, № 2, с. 19
12. Кисляков А. Г. — Изв. вузов — Радиофизика, 1966, 9, № 3, с. 451.
13. Кисляков А. Г. и др. — Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1968, 4, № 3, с. 321.
14. Zabolotniy V. F., Iskhakov I. A., Sokolov A. V., Sukhonin E. V. — Infrared Physics, 1978, 18, № 5/6, p. 815.

Институт радиотехники и электроники
АН СССР

Поступила в редакцию
30 июля 1979 г.,
после доработки
17 января 1980 г.

EXPERIMENTAL STUDY OF MILLIMETER WAVE ATTENUATION IN
CLOUDNESS ATMOSPHERE

*V. F. Zabolotniy, I. I. Zinchenko, I. A. Iskhakov, A. V. Sokolov,
E. V. Sukhonin, V. I. Chernyshev*

Results of two-year measurements are presented of the radiation attenuation at wavelengths $\lambda = 4.1, 4.0, 3.5, 2.0, 1.3, 1.25$ and 0.73 mm in clouds of different forms. It is stated that attenuation is considerably larger in the warm half-year than in the cold one in clouds of similar forms. In all forms of clouds except for cumulus-rain clouds, thick cumulus and stratified fog clouds the average attenuation in clouds at $\lambda > 1$ mm is smaller than the molecular absorption.