

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.9>

УДК: 535.36; 621.396.11

## СПЕКТРАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТАЮЩЕМ СНЕГЕ

В.А. Голунов

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал  
141190, Фрязино, пл. Введенского, 1

Статья поступила в редакцию 11 сентября 2024 г.

**Аннотация.** В данной работе исследована возможность описания изменения диэлектрических параметров снега на начальной стадии его таяния на частотах 22.2, 37.5, 94, 150 и 300 ГГц. Были использованы четыре модели смешения воздуха и сферических частиц льда и воды: «сухой снег-вода», «лед-вода-воздух», «влажный лед-воздух» и «сухой снег-вода». Диэлектрические параметры тающего снега рассчитывались по следующим формулам комплексной диэлектрической проницаемости: формула Максвелла Гарнетта для двухкомпонентной смеси «сухой снег-вода», формула трехфазной смеси для модели «лед-вода-воздух», формулы Максвелла Гарнетта и Винера для двухкомпонентной смеси «лед-вода» и формула Максвелла Гарнетта для смеси «влажный лед-воздух». Установлено что модели «влажный лед-воздух» (с применением формулы Винера для расчета комплексной диэлектрической проницаемости влажного льда) и «лед-вода-воздух» приводят к почти совпадающим результатам, в то время как результаты двух других моделей заметно отличаются. С другой стороны, все модели показали, что экстремум спектра мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости тающего снега расположен на частоте 94 ГГц. Применимость перечисленных выше

моделей для расчета коэффициента поглощения тающего снега со сферическими частицами льда и воды верифицировалась результатами соответствующих расчетов с использованием теории Ми для практически не рассеивающих частиц льда размером 10 мкм при их объемной плотности 0.2; 0.4 и объемной плотности воды 0.005, 0.01, 0.02 и 0.03. Установлено, что в полосе частот 22...300 ГГц частотная зависимость коэффициента поглощения тающего снега удовлетворительно описывается моделью «влажный лед-воздух» при двукратном использовании формулы Максвелла Гарнетта.

**Ключевые слова:** комплексная диэлектрическая проницаемость, микроволны, тающий снег, спектр поглощения, теория Ми.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

**Автор для переписки:** Голунов Валерий Алексеевич, [golsnow@mail.ru](mailto:golsnow@mail.ru)

## Введение

Одной из задач пассивного дистанционного зондирования снежного покрова из космоса является определение границ зон снеготаяния. Метод основан на зависимости радиояркостной температуры снега от его влажности. Многочисленные эксперименты показали, что при таянии снега его радиояркостная температура может возрастать почти до значений его термодинамической температуры [1-3]. Это явление обусловлено тем, что вследствие увеличения влажности снега возрастает погонное поглощение, что, в свою очередь, ослабляет эффект объемного рассеяния, уровень которого определяет нижнюю границу радиояркостной температуры.

В [4] экспериментально обнаружено, что крутизна возрастания радиояркостной температуры тающего снега на частоте 37.5 ГГц выше, чем на частоте 140 ГГц, а на частоте 300 ГГц [5] при таянии снега в горных условиях радиояркостная температура остается практически неизменной. Для интерпретации этих эффектов необходимо иметь расчетные или

экспериментальные данные по спектральной зависимости коэффициентов поглощения и рассеяния от влажности снега.

К настоящему времени влияние влажности снега на его диэлектрические свойства экспериментально исследовались на частотах ниже 37 ГГц: 850 MHz, 1.9 GHz, 5.6 GHz, and 12.6 GHz [6-9]. Согласно [6], тающий снег имеет два различных режима насыщения водой: маятниковый и фуникулерный. В маятниковом режиме воздух непрерывен по всему поровому пространству, а жидкость находится в виде изолированных включений. Это происходит при низкой влажности. В фуникулерном режиме жидкость распространяется в снеге непрерывно, а воздух находится в виде отдельных пузырьков в узких сужениях пор. Фуникулерное распределение охватывает диапазон от верхней границы маятникового режима до полного насыщения водой порового объема снега. Верхней границе маятникового режима, как установлено в [8], соответствует примерное значение объемной влажности 3%. При этом следует отметить, что именно на интервале объемной влажности 0...3% происходит нарастание радиояростной температуры тающего снега до значения, почти равного 273 К [2].

В [6] также отмечено, что в отличие от почв или других пористых материалов, состоящих из жесткой сети твердых частиц, частицы льда в тающем снеге меняют размер, форму и даже сцепление в зависимости от режима насыщения жидкостью. При малых содержаниях жидкости в маятниковом режиме насыщения три фазы водного вещества находятся во взаимном контакте. Это требует сложных геометрических решений, чтобы удовлетворить всем геометрическим ограничениям, обусловленным поверхностными свободными энергиями трехфазных границ. Наличие жидкоподобных или неупорядоченных поверхностных слоев оказывает незначительное влияние на диэлектрическую проницаемость снега. Удобное предположение о том, что жидкая вода представляет собой оболочки, покрывающие поверхность льда, приводит к очень большим ошибкам в расчете

диэлектрической проницаемости и в любом случае является физически необоснованным.

В [8] установлено, что экспериментальные данные в полосе частот 3...37 ГГц и на интервале объемной плотности воды 0...0.12 удовлетворительно аппроксимируются формулой Debye-like model, подобной формуле Дебая, описывающей диэлектрические характеристики воды. Основанием для разработки Debye-like model послужила существенная разница диэлектрических параметров снега и воды, поэтому, по мнению авторов, даже когда содержание жидкой воды составляет всего лишь 1% по объему, в спектральном поведении смеси влажного снега, вероятно, будет доминировать дисперсионное поведение воды. В результате широкого исследования диэлектрического поведения снега в диапазоне частот от 3 до 37 ГГц в [8] были сделаны следующие выводы:

1) диэлектрическая проницаемость сухого снега увеличивается практически линейно с увеличением плотности снега;

2) дисперсионное поведение воды определяет спектральное поведение влажного снега. Частота релаксации влажного снега составляет примерно 9 ГГц, что соответствует частоте релаксации жидкой воды;

3) из разработанных эмпирических моделей модифицированная модель Дебая лучше всего описывает диэлектрическое поведение влажного снега в зависимости от его физических параметров и частоты;

4) по мере таяния снега включения воды приобретают игольчатую форму. При объемной плотности воды свыше 3%, включения становятся дискообразными. Эти результаты, полученные путем оптимизации формы водных включений в двухфазной и трехфазной моделях Польдера-Ван Сантена, до измеренных значений, соответствуют гидродинамической структуре влажного снега.

Из вышеизложенного следует, что именно в маятниковом режиме происходит возрастание радиояркой температуры тающего снега от уровня

излучения сухого снега до уровня излучения черного тела при температуре, близкой к термодинамической температуре тающего снега, т.е. 273 К.

Целью данной статьи является теоретическая оценка спектральной зависимости коэффициента поглощения излучения снега, тающего в маятниковом режиме, в приближении пренебрежимо малого объемного рассеяния в полосе частот 22...300 ГГц. Эта оценка необходима для интерпретации экспериментальных зависимостей радиояркостной температуры миллиметрового излучения тающего снега, приведенных в [4,5].

## 1. Модели смешения льда, воды и воздуха

Поскольку компонентами тающего снега являются воздух, лед и жидкая вода, то с радиофизической точки зрения тающий снег следует рассматривать как трехфазную гетерогенную смесь. Если среда представляет собой мелкодисперсную смесь, то можно рассматривать электрическое поле, усредненное по объемам, большим по сравнению с масштабами неоднородностей. По отношению к такому среднему полю смесь является однородной и изотропной средой и как таковая может характеризоваться определенным эффективным значением диэлектрической проницаемости. Для этого случая разработан ряд теоретических формул расчета комплексной диэлектрической проницаемости (КДП).

Тающий снег следует рассматривать как матричную среду, в которой частицы льда и свободная вода распределены в непрерывной среде – воздухе. В такой среде компоненты геометрически неравноправны, поэтому выражение для КДП существенно изменяется при перемене роли фаз [10]. КДП матричных систем описываются такими несимметричными соотношениями, как формула Максвелла – Гарнетта [10, 11]:

$$\varepsilon_{см} = \varepsilon_{\phi} + 3\rho_V \varepsilon_{\phi} \frac{\varepsilon_{вкл} - \varepsilon_{\phi}}{\varepsilon_{вкл} + 2\varepsilon_{\phi} - \rho_V (\varepsilon_{вкл} - \varepsilon_{\phi})},$$

где  $\varepsilon$  – КДП (далее везде  $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ ),  $\rho_V$  –объемная плотность включений, индексы «см», «ф» и «вкл» относятся к смеси, фоновой (непрерывной) среде и включениям соответственно.

Поскольку рекомендованных рецептов для расчета КДП тающего снега в коротковолновой части миллиметрового и в субмиллиметровом диапазонах волн пока нет, выполним анализ возможностей применения для этих целей нижеследующего ряда теоретических формул в приближении сферических частиц льда и воды. В связи с тем, что диэлектрическая проницаемость воды существенно превосходит диэлектрическую проницаемость льда, особый акцент сделан на применение формулы Максвелла Гарнетта, допускающей точное рассмотрение при произвольной разнице между диэлектрическими проницаемостями фоновой (непрерывной) среды и диспергированной фазы, но при малой концентрации последней [12]. Условие малой концентрации воды в снеге удовлетворяется, если рассматривать только начальную стадию процесса таяния (т.е. маятниковый режим). При этом формула Максвелла Гарнетта приводит к результатам, практически совпадающими с результатами формул Бруггемана (Bruggeman), Полдер-ван Сантена (Polder–van Santen) и Когерентного потенциала (Coherent potential) [11, 12].

Возможны различные способы расчета КДП тающего снега. Во-первых, КДП можно рассчитать, рассматривая снег в виде двухкомпонентной смеси сухого снега как фонового материала и капелек воды как включений (модель «сухой снег-вода»). Формула Максвелла Гарнетта в этом случае имеет вид:

$$\varepsilon_{см} = \varepsilon_{сн} + 3m_V \varepsilon_{сн} \frac{\varepsilon_{\phi} - \varepsilon_{сн}}{\varepsilon_{\phi} + 2\varepsilon_{сн} - \rho_V (\varepsilon_{\phi} - \varepsilon_{сн})}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – КДП, индексы «см», «сн» и «в» относятся соответственно к смеси, снегу и воде,  $m_V$  – объемная плотность воды.

Во-вторых, КДП тающего снега можно рассчитать с помощью формулы трехфазного смешения льда, воды и воздуха (модель «лед-вода-воздух») [10].

$$\frac{\varepsilon_{см} - 1}{\varepsilon_{см} + 2} = \rho_l \frac{\varepsilon_l - 1}{\varepsilon_l + 2} + m_V \frac{\varepsilon_{\phi} - 1}{\varepsilon_{\phi} + 2}, \quad (2)$$

где  $\rho_l$  и  $m_V$  – объемные плотности льда и воды соответственно, при этом  $\rho_l + m_V = \rho_V$ ,  $\rho_V$  – объемная плотность тающего снега.

В-третьих, КДП тающего снега можно рассчитать следующим образом: сначала рассчитывается КДП смеси «лед-вода», а затем КДП смеси «влажный лед-воздух». Для расчета КДП смеси «лед-вода» воспользуемся двумя существенно отличающимися формулами для сферических частиц: формулой Винера

$$\frac{\varepsilon_{вл} - 1}{\varepsilon_{вл} + 2} = \frac{\varepsilon_г - 1}{\varepsilon_г + 2} \delta + \frac{\varepsilon_l - 1}{\varepsilon_l + 2} (1 - \delta) \quad (3)$$

и формулой Максвелла Гарнетта

$$\varepsilon_{вл} = \varepsilon_l + 3\delta \frac{\varepsilon_l (\varepsilon_г - \varepsilon_l)}{\varepsilon_г + 2\varepsilon_l - \delta(\varepsilon_г - \varepsilon_l)}, \quad (4)$$

где индекс «вл» относится к влажному льду,  $\delta$  – объемное содержание воды во льду. Затем КДП тающего снега  $\varepsilon_{см}$  будем рассчитывать по формуле Максвелла Гарнетта в виде:

$$\varepsilon_{см} = 1 + 3\rho_V \frac{\varepsilon_{вл} - 1}{\varepsilon_{вл} + 2 - \rho_V(\varepsilon_{вл} - 1)}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{вл}$  определяется соотношениями (3) или (4),  $\rho_V$  – объемная плотность тающего снега. Модели, описываемые сочетаниями формул (3), (5) и (4), (5), назовем как «влажный лед Винер-воздух» и «влажный лед МГ-воздух» соответственно.

Отметим, что объемная плотность  $m_V$  воды в смеси (5) и объемная плотность  $\delta$  воды во льду связаны соотношением:

$$m_V = \delta \rho_V. \quad (6)$$

## 2. Результаты расчетов комплексной диэлектрической проницаемости

Нижеследующие расчеты по формулам (1)-(5) выполнены с использованием приведенных в Таблице 1 диэлектрических параметров льда [13] и воды при температуре 0 °С [13, 14].

На рис. 1а,б и рис. 2а,б представлены графики спектров действительной и мнимой частей КДП тающего снега с объемными плотностями 0.2 и 0.4 при объемной плотности воды 0.04, рассчитанные для всех четырех рассматриваемых моделей.

Таблица 1. Диэлектрические параметры льда и воды при 0 °С.

КДП	частота, ГГц				
	22.2	37.5	94	150	300
$\epsilon'$ лед	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15
$\epsilon''$ лед	0.0034	0.006	0.01	0.015	0.02
$\epsilon'$ вода	17.45	9.99	6.16	5.8	5.58
$\epsilon''$ вода	29	18.74	7.37	4.94	2.47

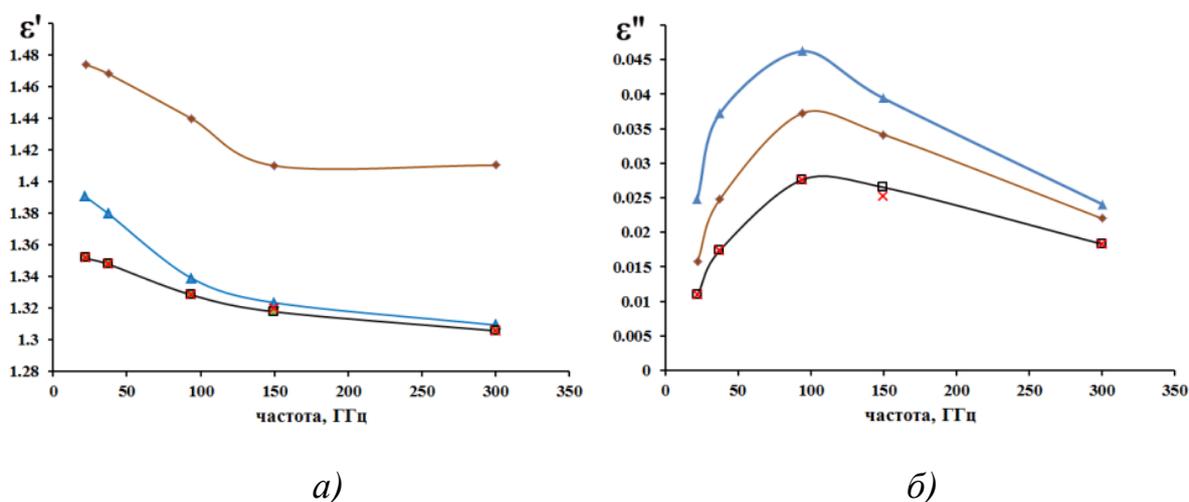


Рис.1. Спектры действительной (а) и мнимой (б) частей комплексной диэлектрической проницаемости тающего снега объемной плотностью 0.2 при объемной плотности воды 0.04. Цвет линий: коричневый – модель «сухой снег-вода», черный – трехфазная модель «лед-вода-воздух», красный – «влажный лед Винер-воздух» и синий – «влажный лед МГ-воздух».

Видно, что только модели «лед-вода-воздух» и «влажный лед Винер-воздух» приводят к почти совпадающим результатам, в то время как результаты других двух моделей заметно отличаются. С другой стороны, все модели

показывают, что экстремум спектра  $\varepsilon''(f)$  расположен на частоте 94 ГГц, а не на частоте 9 ГГц.

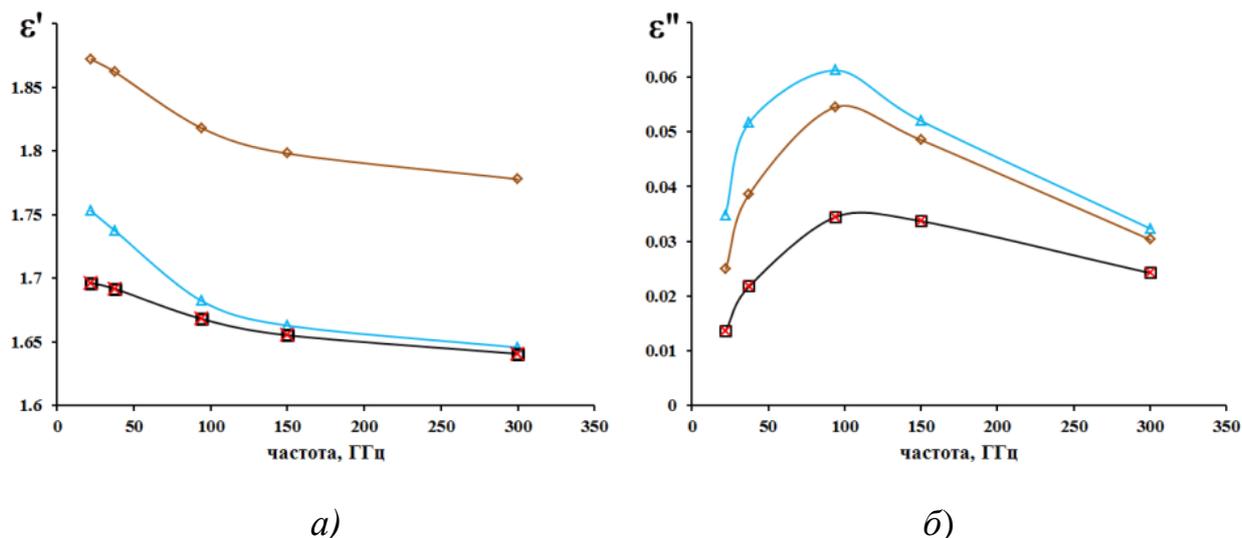


Рис. 2. Спектры действительной (а) и мнимой (б) частей комплексной диэлектрической проницаемости тающего снега с объемной плотностью 0.4 при объемной плотности воды 0.04. Цвет линий: коричневый – модель «сухой снег-вода», черный – трехфазная модель «лед-вода-воздух», красный – «влажный лед Винер-воздух» и синий – «влажный лед МГ-воздух».

### 3. Сопоставление графиков спектра поглощения, рассчитанных с использованием формул КДП для смесей и по теории Ми

С точки зрения радиометрии особый интерес представляет спектр коэффициента поглощения тающего снега как объемно рассеивающей среды, поскольку эффект объемного рассеяния сильно зависит от поглощения. Переход к рассмотрению спектра коэффициента поглощения позволяет привлечь к исследованию теорию Ми в качестве численного эксперимента, позволяющего выявить лучшую из приведенных выше методик расчета.

Коэффициент поглощения интенсивности излучения однородной среды определяется, как известно [12], в виде

$$k_a = \frac{2\pi\varepsilon''}{\lambda n}, \tag{7}$$

где  $n = \sqrt{0.5\varepsilon'(\sqrt{1 + (\varepsilon'' / \varepsilon')^2} + 1)}$ .

Анализируемые методики разработаны для нерассеивающих сред, поэтому расчеты по теории Ми выполнялись для частиц диаметром 10 мкм,

т.е. много меньших 1 мм. Кроме того, все расчеты выполнены при значениях объемной плотности воды в снеге  $m_V = 0.005, 0.01, 0.02$  и  $0.03$  с использованием диэлектрических параметров льда и воды, указанных в Таблице 1. Расчеты по теории Ми выполнены на калькуляторе [15].

На рис. 3а,б,в,г и рис. 4 а,б,в,г показаны графики спектров коэффициента поглощения, рассчитанные по теории Ми (при значениях объемной плотности тающего снега 0.2 и 0.4 и объемной плотности воды 0.005, 0.01, 0.02 и 0.03) и моделям (1)-(5) при подгоночных значениях объемной плотности воды.

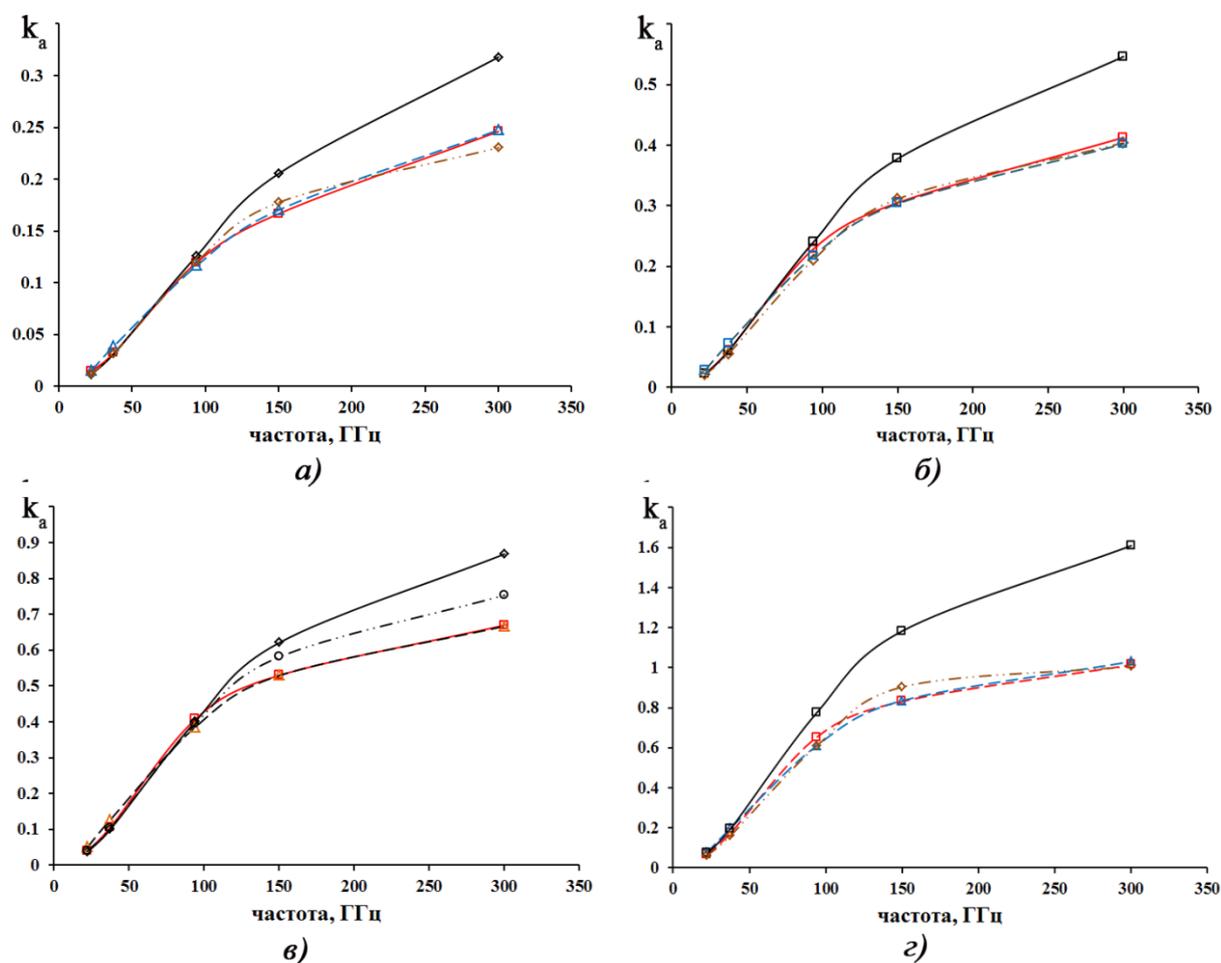


Рис. 3. Спектры коэффициента поглощения тающего снега с объемной плотностью 0.2 при объемной плотности воды 0.005 (а), 0.01 (б), 0.02 (в) и 0.03 (г). Цвет линий: красный – теория Ми, черный – трехфазная модель «лед-вода-воздух», коричневый – модель «сухой снег-вода» и синий – «влажный лед МГ-воздух».

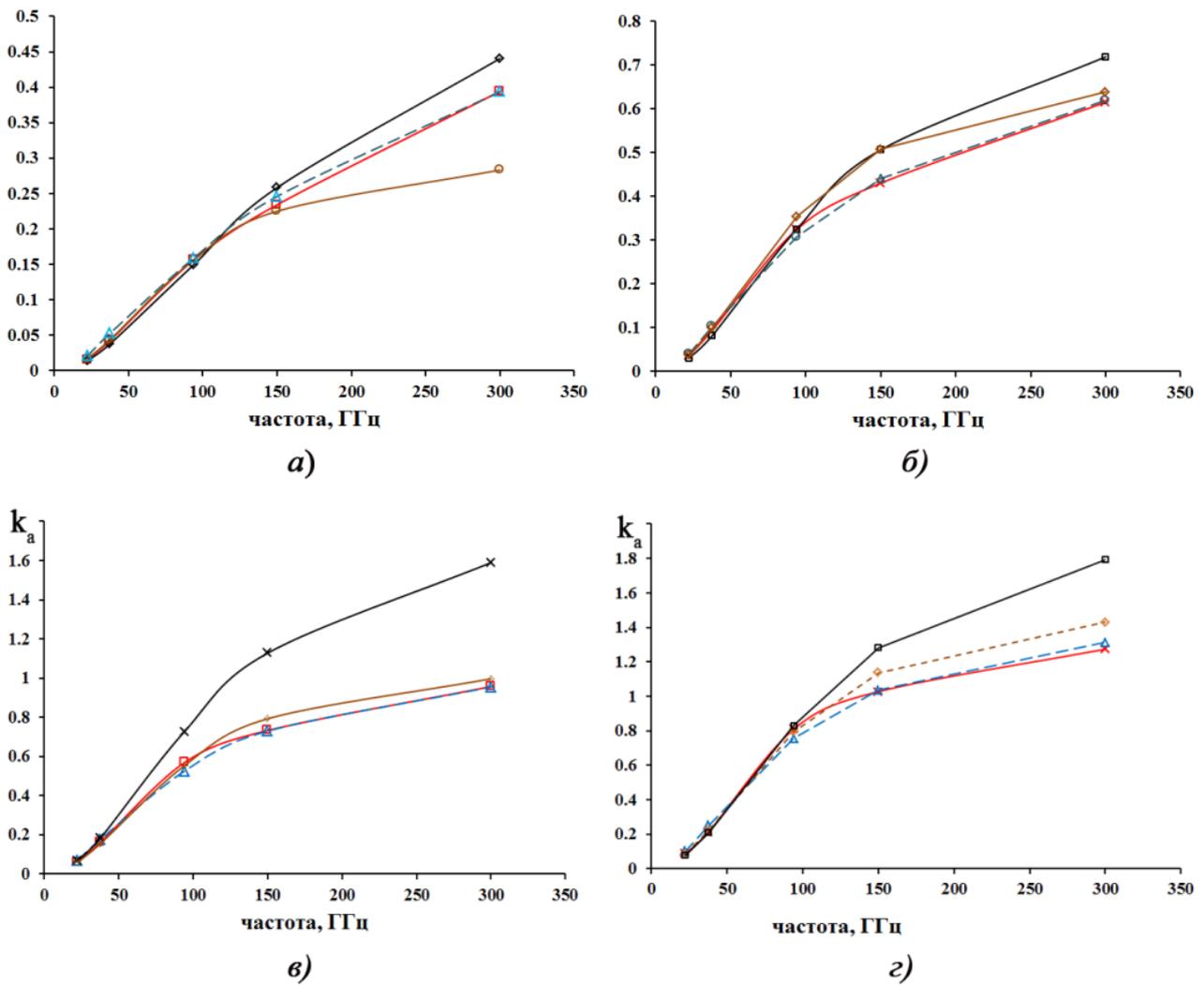


Рис. 4. Спектры коэффициента поглощения тающего снега с объемной плотностью 0.4 при объемной плотности воды 0.005 (а), 0.01 (б), 0.02 (в) и 0.03 (з). Цвет линий: красный – теория Ми, черный – трехфазная модель «лед-вода-воздух», коричневый – модель «сухой снег-вода» и синий – «влажный лед МГ-воздух».

Другими словами, графики, рассчитанные по вышеуказанным моделям, представляют собой аппроксимации графиков, рассчитанных по теории Ми. В Таблице 2 представлены как исходные значения объемной плотности воды при расчетах по теории Ми, так и ее подгоночные значения при расчетах по моделям (1), (2) и (4)-(5).

Таблица 2. Значения объемной плотности воды в снеге, использованные при расчетах спектров коэффициента поглощения по теории Ми и при их аппроксимации результатами модельных алгоритмов.

объемная плотность снега	вид модели	объемная плотность воды			
		<b>0.005</b>	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>
0.2	теория Ми	<b>0.005</b>	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>
	влажный лед МГ+воздух	0.0048	0.096	0.018	0.03
	сухой снег+вода	0.008	0.014	0.026	0.04
	лед+вода+воздух	0.01	0.02	0.034	0.064
0.4	теория Ми	<b>0.005</b>	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>
	влажный лед МГ+воздух	0.0056	0.012	0.0216	0.032
	снег+вода	0.008	0.018	0.028	0.04
	лед+вода+воздух	0.01	0.05	0.056	0.064

Из анализа графиков, показанных на рис. 3 и рис. 4, следует, что только одна из моделей, а именно, модель «влажный лед МГ+воздух», представленная выше парой формул (4), (5), достаточно точно аппроксимирует спектр коэффициента поглощения, рассчитанный по теории Ми, при этом, как следует из Таблицы 2, ее подгоночные значения объемной плотности воды незначительно отличаются от использованных в расчетах по теории Ми.

На рис. 5а,б показаны графики зависимости коэффициента поглощения на рассматриваемых частотах от объемной плотности воды  $m_v$  в тающем снеге при объемной плотности снега 0.2 и 0.4, рассчитанные с помощью модели «влажный лед МГ+воздух». Из графиков следует, что функция  $k_a(m_v)$  является линейной на всех рассматриваемых частотах, что обусловлено малыми значениями  $m_v$ .

Таким образом, в результате выполненного исследования установлено, что из четырех предложенных методик расчета коэффициента поглощения излучения тающего снега на частотах 22...300 ГГц только одна, основанная на модели смеси «влажный лед–воздух» при двукратном использовании формулы Максвелла Гарнетта, удовлетворительно описывает спектр коэффициента поглощения в приближении пренебрежимо слабого объемного рассеяния в снеге. Коэффициент поглощения линейно зависит от объемной плотности воды

в снеге на интервале ее значений  $0 \dots 0.03$ , при этом, чем выше частота, тем больше коэффициент поглощения.

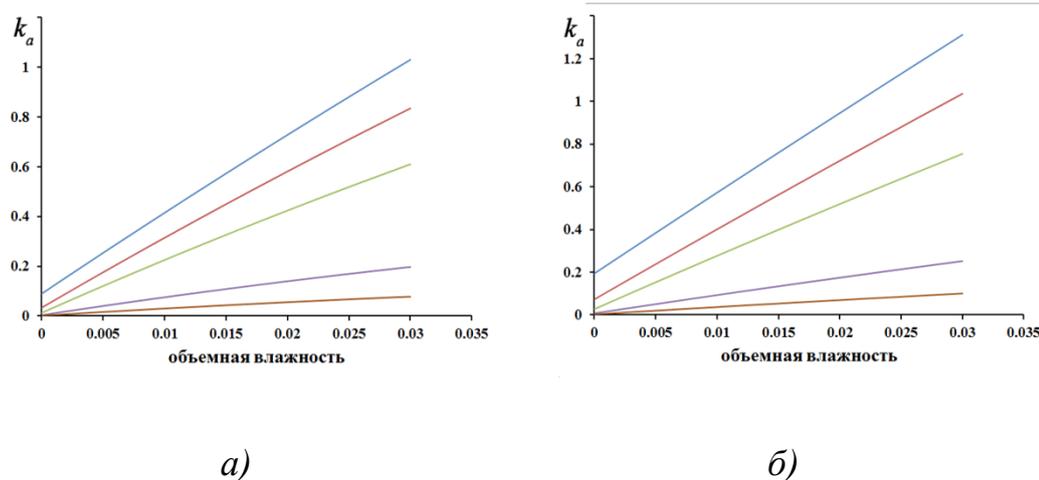


Рис.5. Графики зависимости коэффициента поглощения тающего снега от объемной плотности воды при объемной плотности снега 0.2 (а) и 0.4 (б) на частотах: 22 ГГц (1), 37.5 ГГц (2), 94 ГГц (3), 150 ГГц (4) и 300 ГГц (5).

#### 4. Обсуждение

Выполненное выше исследование является, фактически, теоретическим в приближении сферических, практически нерассеивающих частиц льда и воды при низкой объемной плотности воды в снеге. Достоинством использования модели сферических частиц является возможность сравнения значений коэффициента поглощения, рассчитанных по формулам смесей и по теории Ми. Однако, известно [10], что в длинноволновом диапазоне диэлектрические параметры смесей могут сильно зависеть от формы частиц, при этом сферическая модель дает слишком низкие значения по сравнению с экспериментами, дисковая завышает эффективную диэлектрическую проницаемость, а лучшим компромиссом является модель игольчатых частиц. В [6] показано, что наилучшее соответствие экспериментальным результатам для реальной части диэлектрической проницаемости мокрого снега в маятниковом режиме может быть достигнуто, если предположить, что частицы воды имеют сфероидальную форму с осевым соотношением 3.5.

Важным параметром в задачах гомогенизации является также отношение размера неоднородностей к длине волны используемого электромагнитного

поля. Если это отношение много меньше единицы, среда кажется волне однородной. В данной работе рассматривается диапазон волн от 1мм до 1.35 см при размерах частиц 0.01мм, т.е. условие для однородности среды выполняется.

Таким образом, применение формул (4) и (5) позволяет получить нижние границы значений диэлектрических параметров и коэффициента поглощения тающего снега.

К настоящему времени известны лишь единственные результаты измерения диэлектрических параметров тающего снега в диапазоне миллиметровых волн, а именно, на частоте 37 ГГц [8]. Экспериментальные зависимости  $\varepsilon'_{cm}(m_v)$  и  $\varepsilon''_{cm}(m_v)$ , полученные при значениях плотности снега  $0.09 \leq \rho_{cn} \leq 0.38 \text{ г/см}^3$  и объемной влажности  $1 \leq m_v \leq 12\%$ , были аппроксимированы сначала для частоты  $f < 15$  ГГц в виде Debye-like model:

$$\varepsilon'_{cm} = A + \frac{0.073 m_v^{1.31}}{1 + (f / f_0)^2},$$

$$\varepsilon''_{cm} = \frac{0.073 (f / f_0) m_v^{1.31}}{1 + (f / f_0)^2},$$

где  $f$  имеет размерность ГГц,  $f_0 = 8.8$  ГГц,

$$A = 1.0 + 1.83 \rho_v + 0.02 m_v^{1.015},$$

а затем в виде Modified Debye-Like model, которая отличается только значениями эмпирических параметров и рекомендована для применения на частотах  $f > 15$  ГГц.

Кроме того, в [8] выполнены расчеты по формуле Полдер-ван Сантена для двухфазной среды с учетом изменения формы водных включений при возрастании объемной влажности снега в соответствии с рекомендациями, приведенными в [6].

Экспериментальные и расчетные графики зависимостей

$$\Delta \varepsilon'_{cm}(m_v) = \varepsilon'_{cm}(m_v) - 1 - 1.832 \rho_{cn}$$

и  $\varepsilon''_{cm}(m_v)$  для частоты 37 ГГц, приведенные в [8], показаны на рис. 6а, б.

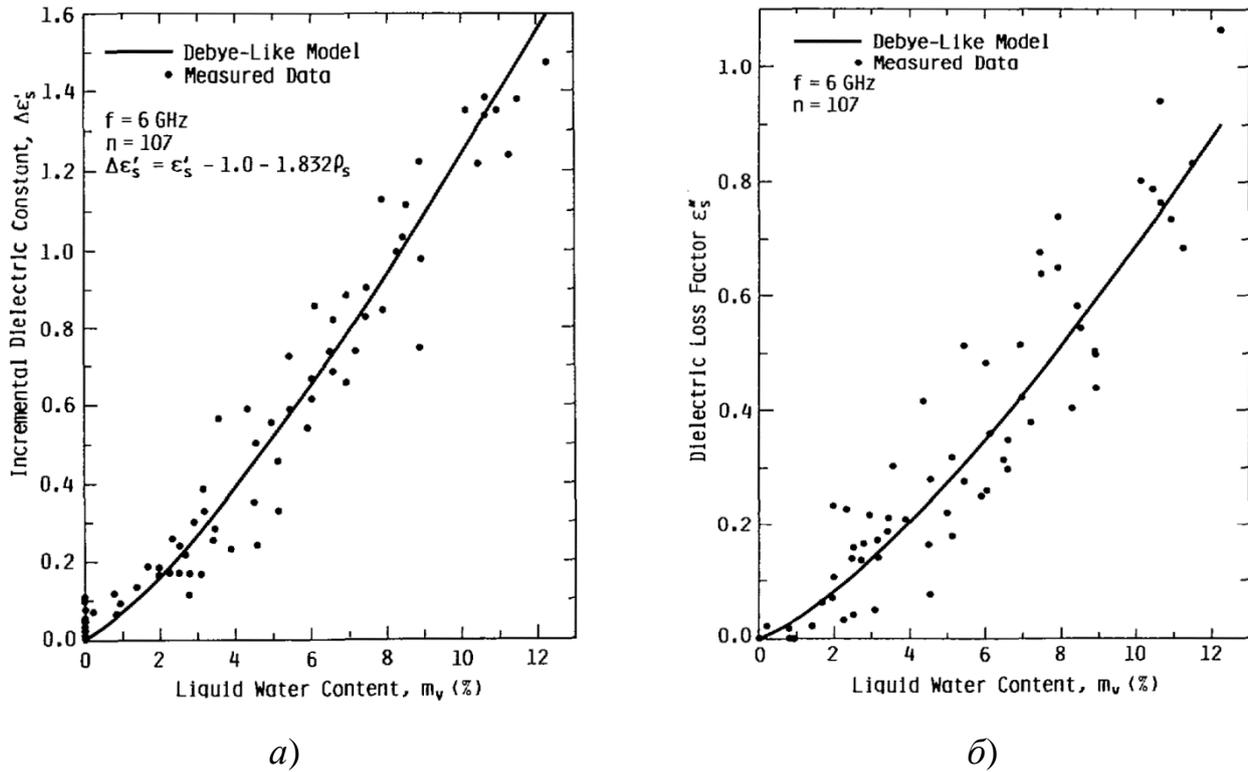


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные графики зависимостей  $\Delta\epsilon'_{cm}(m_v)$  и  $\epsilon''_{cm}(m_v)$  для частоты 37 ГГц [8].

В соответствии с моделью Modified Debye-like model максимум спектральной зависимости  $\epsilon''_{cm}(f)$  находится на частоте 9 ГГц, что существенно отличается от результата исследования, выполненного в данной работе, и состоящего в том, что максимум спектральной зависимости  $\epsilon''_{cm}(f)$  находится в коротковолновой части миллиметрового диапазона. Причина расхождения состоит, по-видимому, в том, что обе модели, Debye-like model и, особенно, Modified Debye-like model, были оптимизированы, как следует из рис. 6, для согласования расчетных и экспериментальных данных при значениях объемной влажности снега на интервале 0...12%. В таком случае, что очевидно, весомой вклад данных при  $m_v \leq 3\%$  оказался малозначительным, поэтому обе модели применимы, в основном, для описания диэлектрических параметров снега при таянии в фуникулерном режиме, в котором снег сильно насыщен влагой. Максимум спектральной зависимости  $\epsilon''_{cm}(f)$  при этом закономерно смещен в сторону низких частот при доминировании дисперсионного поведения воды.

Применение модели Modified Debye-like model полезно при расчете граничных условий, когда радиояркая температура тающего снега достигает значения, близкого к его термодинамической температуре, т.е., когда поглощение в снеге доминирует над объемным рассеянием.

## Заключение

В данной работе исследована возможность описания изменения диэлектрических параметров снега на начальной стадии его таяния на частотах 22.2, 37.5, 94, 150 и 300 ГГц. Были использованы четыре модели смешения воздуха и сферических частиц льда и воды: «сухой снег-вода», «лед-вода-воздух», «влажный лед-воздух» и «сухой снег-вода». Диэлектрические параметры тающего снега рассчитывались по следующим формулам комплексной диэлектрической проницаемости: формула Максвелла Гарнетта для двухкомпонентной смеси «сухой снег-вода», формула трехфазной смеси для модели «лед-вода-воздух», формулы Максвелла Гарнетта и Винера для двухкомпонентной смеси «лед-вода» и формула Максвелла Гарнетта для смеси «влажный лед-воздух». Установлено что модели «влажный лед-воздух» (с применением формулы Винера для расчета КДП влажного льда) и «лед-вода-воздух» приводят к почти совпадающим результатам, в то время как результаты двух других моделей заметно отличаются. С другой стороны, все модели показали, что экстремум спектра  $\varepsilon''(f)$  расположен на частоте 94 ГГц.

Применимость перечисленных выше моделей для расчета коэффициента поглощения тающего снега со сферическими частицами льда и воды верифицировалась результатами соответствующих расчетов с использованием теории Ми для практически не рассеивающих частиц льда размером 10 мкм при их объемной плотности 0.2; 0.4 и объемной плотности воды 0.005, 0.01, 0.02 и 0.03. Установлено, что в полосе частот 22...300 ГГц частотная зависимость коэффициента поглощения тающего снега удовлетворительно описывается моделью «влажный лед-воздух» при двукратном использовании формулы Максвелла Гарнетта.

Сопоставление полученных данных с известными моделями Debye-like model Modified и Debye-like model показало существенное расхождение в положении экстремума мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости на частотной оси. Причина расхождения состоит в том, что обе модели, Debye-like model и, особенно, Modified Debye-like model, были оптимизированы для согласования модельных и экспериментальных данных при значениях объемной влажности снега на интервале 0...12%. При этом весовой вклад данных при  $m_v \leq 3\%$  оказался малозначительным, поэтому обе модели применимы, в основном, для описания диэлектрических параметров снега при таянии в фуникулерном режиме, в котором снег сильно насыщен влагой. Как следствие, при доминировании дисперсионного поведения воды максимум спектральной зависимости  $\varepsilon''_{cm}(f)$  закономерно смещен в сторону низких частот, именно, к частоте 9 ГГц.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

### Литература

1. Kennedy J.M., Sakamoto R.T. Passive microwave determinations of snow wetness factors (Passive microwave determination of snow wetness factors) // 1966. – 1966. – С. 161-171.
2. Ulaby F.T., Stiles W.H. The Active and Passive Microwave Response to Snow Parameters. 1. Wetness // J. Geophysical Research. – 1980. – Vol. 85. – №. C2. – P. 1037-1044. <https://doi.org/10.1029/JC085iC02p01037>
3. Боярский Д.А., Тихонов В.В. Учет стратиграфии снежного покрова при моделировании его излучательной способности в СВЧ диапазоне // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 1999. – Т. 42. – №. 9. – С. 845-857.
4. Голунов В.А. Спектральные особенности теплового излучения тающего снежного покрова // XIV Всес. конф. по распр. р/волн. Тезисы докладов, часть 2. – Ленинград, 1982. – С. 193-195.

5. Кузнецов И.В., Федосеев Л.И., Швецов А.А. Радиометрия снежного покрова в коротковолновой части миллиметрового диапазона // Изв. высш. уч. зав.- Радиофизика. – 1997. – Т. 40. – №. 9. – С. 1113.
6. Colbeck S.C. The geometry and permittivity of snow at high frequencies // J. Appl. Physics. – 1982. – V.53. – P.4495-4500. <https://doi.org/10.1063/1.331186>
7. Tiuri M. et al. The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies // IEEE Journal of oceanic Engineering. – 1984. – Т. 9. – №. 5. – С. 377-382. <https://doi.org/10.1109/JOE.1984.1145645>
8. Hallikainen M., Ulaby F., Abdelrazik M. Dielectric properties of snow in the 3 to 37 GHz range // IEEE transactions on Antennas and Propagation. – 1986. – Т. 34. – №. 11. – С. 1329-1340. <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143757>
9. Denoth A. Snow dielectric measurements //Advances in Space Research. – 1989. – Т. 9. – №. 1. – С. 233-243. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(89\)90491-2](https://doi.org/10.1016/0273-1177(89)90491-2)
10. Sihvola A. Electromagnetic Mixing Formulae and Applications. – London, U.K., The Institution of Engineering and Technology, 1999. P. 284.
11. Sihvola A. Mixing rules with dielectric coefficients // Subsurface technologies and applications. – 2000. -Vol. 1. – №. 4. – P. 393-415. <https://doi.org/10.1023/A:1026511515005>
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – Гостехиздат, 1957. – Т. 68.
13. Голунов В.А., Коротков В.А., Сухонин Е.В. Эффекты рассеяния при излучении миллиметровых волн атмосферой и снежным покровом. Итоги науки и техники, сер // Радиотехника. – 1990. – Т. 41. – С. 68-136.
14. Розенберг В.И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. – Гидрометеиздат, 1972. – 378 с.
15. Prah S. et al. Mie scattering calculator. – 2007. Date of access 07.08.2024. URL: [https://omlc.org/calc/mie\\_calc.html](https://omlc.org/calc/mie_calc.html)

**Для цитирования:**

Голунов В.А. Спектральная зависимость коэффициента поглощения микроволнового излучения в тающем снеге. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.9>