

## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 535.36,621.396.11

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕЛОГО МРАМОРА В ДИАПАЗОНЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН МЕТОДАМИ РАДИОМЕТРИИ

© 2022 г. В. А. Голунов\*

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

\*E-mail: golsnow@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2021 г.

После доработки 21.06.2021 г.

Принята к публикации 23.07.2021 г.

Экспериментально исследованы диэлектрические характеристики двух плит из белого мрамора толщиной 20 мм с использованием радиометров на частотах 37,5, 60 и 94 ГГц и разработанных методик измерения коэффициентов отражения и пропускания образцов в лабораторных условиях. Обнаружено, что в диапазоне миллиметровых волн показатели преломления и поглощения белого мрамора практически не зависят от частоты излучения, при этом значения коэффициента поглощения ниже значений на более низких частотах.

DOI: 10.31857/S0033849422010041

#### ВВЕДЕНИЕ

Диэлектрические свойства горных пород, к которым относится мрамор, широко исследуются в различных диапазонах волн для решения задач геологии и исследования планет [1–7]. Мрамор, обладающий высокими декоративными качествами, широко используется в строительстве и архитектуре, в связи с чем его диэлектрические свойства необходимо учитывать также при моделировании миллиметровых каналов сотовой и беспроводной связи [8–10].

Из различных источников известно, что мрамор – кристаллически-зернистая метаморфическая карбонатная порода, продукт перекристаллизации известняка, реже – доломита. Благодаря тесному сцеплению между собой зерен кальцита порода хорошо полируется. Размер тесно сросшихся минеральных зерен – от долей миллиметра (мелкозернистые) до 1 см, реже до 3...5 см (средне- и крупнозернистые мраморы). Плотность камня составляет 2650...2900 кг/м<sup>3</sup>, пористость – ~0,4%. Цвет мрамора зависит от примесей. Наиболее чистым является белый мрамор. Чистый кальцитовый мрамор – диэлектрик, обладающий высокими электроизоляционными свойствами.

На интервале частот 100 Гц...100 кГц экспериментально обнаружена диэлектрическая дисперсия образцов мрамора, которая согласуется с феноменологической моделью Коула–Коула, а подгоночные параметры модели сильно зависят от

содержания Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [5]. К настоящему времени диэлектрические характеристики мрамора исследованы на частотах до 50 ГГц [6].

Основой определения диэлектрических характеристик материалов являются измерения коэффициентов отражения и пропускания электромагнитных волн. Как правило, такие измерения выполняются с помощью активных систем, таких как резонаторные [11, 12], волноводные [13–15] и приемопередающие комплексы в свободном пространстве [16, 17]. Для реализации таких измерений требуются специально изготовленные достаточно тонкие образцы мрамора.

Радиотепловое излучение материалов также зависит от их коэффициентов отражения и пропускания, поэтому радиометры могут быть использованы как инструмент исследования диэлектрических свойств. В сравнении с активными системами их основными недостатками являются ограниченный энергетический потенциал и широкая полоса частот принимаемого излучения. Однако последний недостаток можно рассматривать как преимущество, поскольку позволяет исследовать диэлектрические свойства материалов при достаточно толстом слое вследствие пренебрежимо слабого эффекта интерференции теплового излучения [18]. Это свойство теплового излучения обуславливает возможность использовать радиометрический метод контроля диэлектрических свойств строительных материалов, включая мрамор, без их разрушения.

Радиометрические методы используются в основном при дистанционном зондировании окружающей среды в целях измерения интенсивности ее теплового излучения, являющегося совокупностью излучений двух и более сред (например, покровы и атмосфера, атмосфера и космос и т.п.). В общем случае, это обстоятельство усложняет выделение только собственного излучения исследуемых сред или только отраженного ими фонового излучения, особенно если интенсивность фонового излучения сильно зависит от угла излучения, а исследуемые среды являются рассеивающими. Тем не менее к настоящему времени разработан ряд методов наземных измерений коэффициентов излучения и зеркального отражения [19] земных покровов в натуральных условиях.

Цель данной работы – показать возможности исследования диэлектрических свойств таких материалов, как плоскопараллельные мраморные плиты, с помощью радиометрических систем миллиметрового диапазона. Исследования выполнены на частотах 37,5, 60 и 94 ГГц в лабораторных условиях. Преимуществом радиометрических измерений в закрытом помещении является однородность яркостного фона.

## 1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Радиояркая температура плоского однородного сплошного слоя в соответствии с законами Кирхгофа, Релея–Джинса и сохранения энергии записывается в виде

$$T(\theta) = \kappa(\theta)T_0 + R(\theta)T_r + t(\theta)T_t, \quad (1)$$

где  $T_0$  – термодинамическая температура исследуемого материала,  $T_r$ ,  $T_t$  – радиояркие температуры подсвечивающего излучения спереди и сзади слоя,  $\kappa$ ,  $r$  и  $t$  – коэффициенты излучения, зеркального отражения и пропускания соответственно, которые связаны законом сохранения энергии:

$$\kappa + R + t = 1.$$

Пренебрегая интерференцией широкополосного излучения внутри слоя толщиной  $h \gg \lambda_0/n$  ( $\lambda_0$  – центральная частота излучения,  $n$  – показатель преломления материала), коэффициенты отражения и пропускания слоя с учетом многократного зеркального отражения внутри слоя запишем в виде

$$R(\theta, h) = r_\Phi(\theta) + \frac{[1 - r_\Phi(\theta_1)]^2 r_\Phi(\theta_1) \exp(-2k_a h \sec \theta_1)}{1 - r_\Phi^2 \exp(-2k_a h \sec \theta_1)}, \quad (2)$$

$$t(\theta, h) = \frac{[1 - r_\Phi(\theta_1)]^2 \exp(-2k_a h \sec \theta_1)}{1 - r_\Phi^2 \exp(-2k_a h \sec \theta_1)}, \quad (3)$$

где  $r_\Phi$  – квадрат модуля коэффициента отражения Френеля на границах слоя, углы  $\theta$  и  $\theta_1$  связаны законом Снеллиуса:

$$\sin \theta = n \sin \theta_1.$$

Квадраты модулей коэффициентов отражения на горизонтальной ( $r$ ) и вертикальной ( $v$ ) поляризациях можно вычислить по соотношениям, следующим из формул для коэффициентов отражения Френеля [20]:

$$r_{\Phi,r}(\theta) = 1 - \frac{4A \cos \theta}{\cos^2 \theta + 2A \cos \theta + B}, \quad (4)$$

$$r_{\Phi,v}(\theta) = 1 - \frac{4A(n^2 + m^2) \cos \theta}{(n^2 + m^2)^2 \cos^2 \theta + 2A(n^2 + m^2) \cos \theta + B}, \quad (5)$$

где  $n$ ,  $m$  – показатели преломления и поглощения исследуемой среды,

$$A = \sqrt{0.5(B + n^2 - m^2 - \sin^2 \theta)},$$

$$B = \sqrt{(n^2 - m^2 - \sin^2 \theta)^2 + 4n^2 m^2}.$$

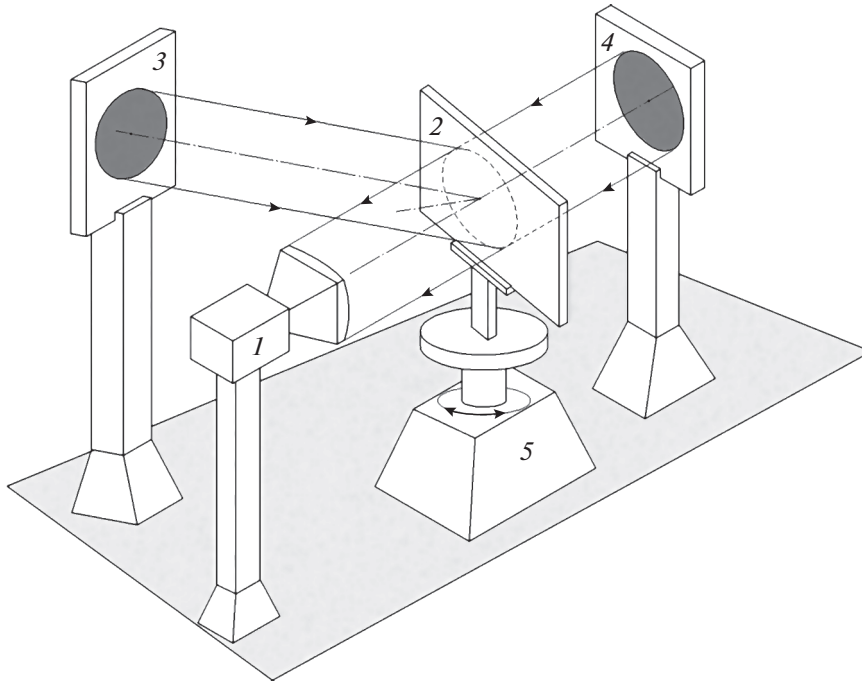
Если слой разместить на поверхности металлического листа, то его коэффициент отражения запишется в виде

$$R_{\text{мет}}(\theta, h) = r_\Phi(\theta) + \frac{[1 - r_\Phi(\theta_1)]^2 \exp(-2k_a h \sec \theta_1)}{1 - r_\Phi^2 \exp(-2k_a h \sec \theta_1)}. \quad (6)$$

## 2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1 показана схема измерений в лабораторных условиях коэффициентов отражения и пропускания плоскопараллельных образцов с помощью радиометра с рупорно-линзовой антенной и “подсвечивающего” черного тела (ЧТ) при термодинамической температуре, отличающейся от температуры помещения. Исследуемую мраморную плиту размещали вертикально на поворотном столе, что обеспечивало возможность измерять угловые зависимости коэффициентов отражения и пропускания. При измерениях коэффициента отражения ЧТ устанавливали в позиции 3, а при измерениях коэффициента пропускания – в позиции 4.

Рассмотрим методику радиометрических измерений, необходимых для нахождения коэффициентов отражения (2), (6) и коэффициента пропускания (3). Пусть измерения проводятся внутри помещения, где термодинамическая температура всех объектов имеет одно и то же значение  $T_0$ . Примем, что в лабораторных условиях термодинамические температуры помещения и мрамора равны  $T_0$ . Тогда при отсутствии ЧТ радиояркие температуры подсвечивающих излучений  $T_r$  и  $T_t$  в (1) тоже будут равны  $T_0$ . Позиции 3 и 4 для



**Рис. 1.** Схема измерения коэффициентов отражения и пропускания мраморной плиты в лабораторных условиях: 1 – радиометр с рупорно-линзовой антенной, 2 – мраморная плита, 3 и 4 – “подсвечивающее” черное тело, 5 – поворотное устройство.

ЧТ (см. рис. 1) и его размеры выбирали такими, чтобы поперечный размер диаграммы направленности рупорно-линзовой антенны был не больше углового размера ЧТ относительно его расстояния до линзы вдоль направления приема. При каждом значении угла  $\theta$  выполняли серию измерений радиояркостной температуры (1):

1) ЧТ и образец находятся вне диаграммы направленности антенны:

$$T_1 = T_0, \quad (7)$$

2) ЧТ установлено в позиции 4 (см. рис. 1), исследуемого образца нет:

$$T_2 = T_{\text{ЧТ}}, \quad (8)$$

3) ЧТ установлено в позиции 4 (см. рис. 1):

$$T_3 = \kappa T_0 + RT_0 + tT_{\text{ЧТ}} = (1 - t)T_0 + tT_{\text{ЧТ}}, \quad (9)$$

4) образец установлен в позиции исследования, ЧТ установлено в позиции 3 (см. рис. 1):

$$T_4 = \kappa T_0 + RT_{\text{ЧТ}} + tT_0 = (1 - R)T_0 + RT_{\text{ЧТ}}, \quad (10)$$

5) на переднюю грань образца наложен металлический лист:

$$T_5 = T_{\text{рЧТ}}. \quad (11)$$

В (8)–(11)  $T_{\text{рЧТ}} = T_{\text{ЧТ}} = T_{\text{ЧТ}}$  ( $T_{\text{ЧТ}}$  – радиояркостная температура ЧТ).

Из соотношений (8) и (9) следуют формулы для определения коэффициентов пропускания и отражения образца:

$$t(\theta) = \frac{T_0 - T_3}{T_0 - T_{\text{ЧТ}}}, \quad (12)$$

$$R(\theta) = \frac{T_0 - T_4}{T_0 - T_{\text{ЧТ}}}. \quad (13)$$

Учтем, что выходной сигнал радиометров в соответствии с законом Релея–Джинса зависит от радиояркостной температуры принимаемого излучения линейным образом, а соотношения (12) и (13) представляют собой отношения разностей радиояркостных температур. Из этого следует, что при измерениях коэффициентов пропускания и отражения по тепловому излучению образца не требуется абсолютной калибровки радиометров, а достаточно регистрации уровней их выходных откликов на радиояркостные температуры (7)–(11).

В качестве ЧТ была использована смесь древесной стружки и сажи толщиной 40 мм, помещенная в пенопластовую емкость с фольгированной задней стенкой. Диаметр излучающей части ЧТ составлял 0.5 м. При измерениях емкость со смесью наполнялась жидким азотом, за счет чего термодинамическая температура ЧТ была соизмерима с температурой жидкого азота 77 К. Контроль радиояркостной температуры ЧТ периодически осуществлялся косвенно, через регистра-

**Таблица 1.** Технические характеристики радиометров

Центральная частота, ГГц	Ширина полосы частот, ГГц	Чувствительность при постоянной времени 1 с, К
37.5	1.6	0.2
60	4	0.05
94	1.5	0.1

**Таблица 2.** Характеристики мраморных плит белого цвета

Номер образца	Ширина, м	Длина, м	Толщина, м	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Характерные размеры зерна, мм
1	0.3	0.45	0.022	2.63	2...5
2	0.45	0.81	0.02	2.47	<1

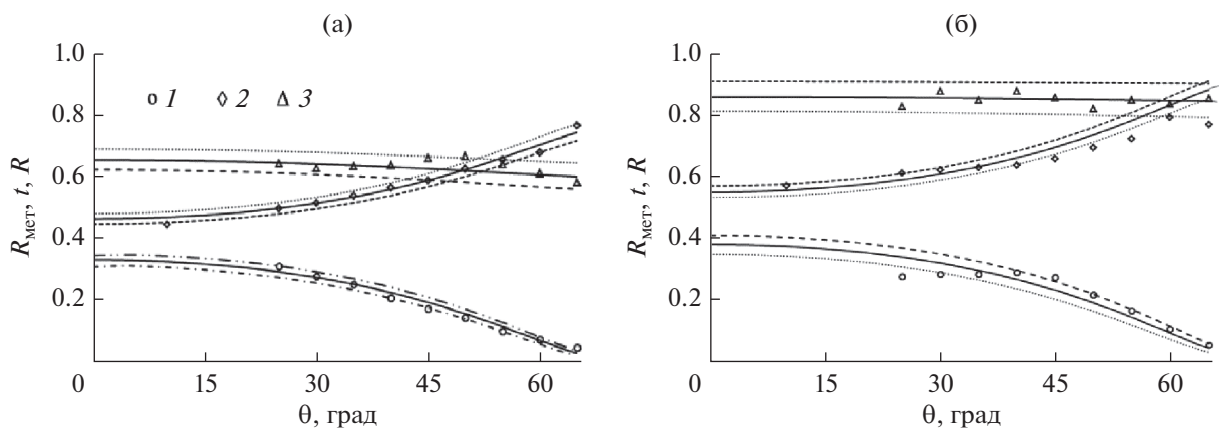
цию уровня выходных откликов радиометра на интенсивности его излучения (8), (11). При измерениях коэффициентов отражения и пропускания образцов расстояние между ЧТ и линзой не превышало 1.5 м, размеры апертуры рупорно-линзовой антенны  $0.18 \times 0.16$  м. Характеристики радиометров приведены в табл. 1.

Были исследованы диэлектрические свойства образцов 1 и 2 из белого мрамора, характеристики которых приведены в табл. 2. Образцы отличались не только размерами, но и структурой мрамора. Образец мрамора 1 имел более крупную зернистую структуру. Оба образца имели незначительное количество синих включений, которых в мраморе 1 было больше, чем в мраморе 2.

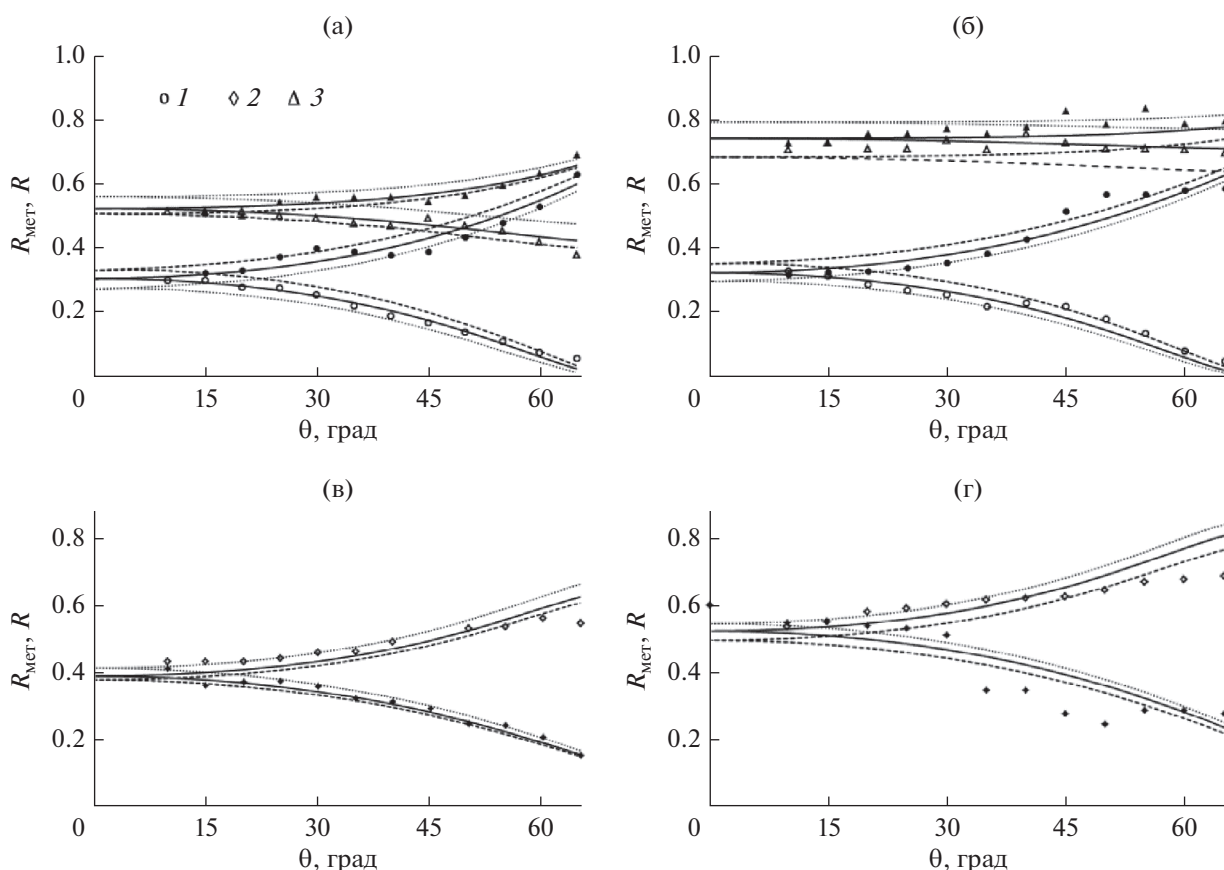
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения выполняли на частоте 37.5 ГГц при вертикальной поляризации и на частотах 60 и 94 ГГц

при двух ортогональных поляризациях (рис. 2–4). На этих рисунках символы соответствуют экспериментальным значениям, сплошные, штриховые и пунктирные линии соответствуют результатам расчетов по формулам (2), (3), (6). Сплошные линии соответствуют расчетам при средних значениях  $n$  и  $m$ , а штриховые и пунктирные – при максимальных и минимальных значениях  $m$  на графиках  $R_{\text{мет}}(\theta)$  и  $t(\theta)$ , а на графиках  $R(\theta)$  – только  $n$ , которые охватывают диапазон разброса экспериментальных значений. Отметим, что коэффициенты отражения  $R$  практически не зависят от  $m$ , поскольку для мрамора на рассматриваемых частотах, как оказалось,  $n \gg m$ . В связи с этим значения  $n$  и  $m$  определяли методом подбора, начиная с  $n$  по экспериментальным значениям  $R(\theta)$ , и затем  $m$ , используя экспериментальные значения  $R_{\text{мет}}(\theta)$  и  $t(\theta)$ . Результаты представлены на рис. 5 и 6.



**Рис. 2.** Экспериментальные (точки) и рассчитанные по формулам (2) (сплошные линии), (3) (штриховые) и (6) (пунктирные) угловые зависимости коэффициентов отражения (1), пропускания (2) и коэффициента отражения мраморных плит на металлическом листе (3) для образцов мрамора 1 (а) и 2 (б) при вертикальной поляризации и частоте излучения 37.5 ГГц.



**Рис. 3.** Экспериментальные (точки) и рассчитанные по формулам (2) (сплошные линии), (3) (штриховые) и (6) (пунктирные) угловые зависимости коэффициентов отражения (1), пропускания (2) и коэффициента отражения мраморных плит на металлическом листе (3) для образцов мрамора 1 (а, в) и 2 (б, г) при вертикальной (светлые точки) и горизонтальной поляризации (темные точки) и частоте излучения 60 ГГц.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

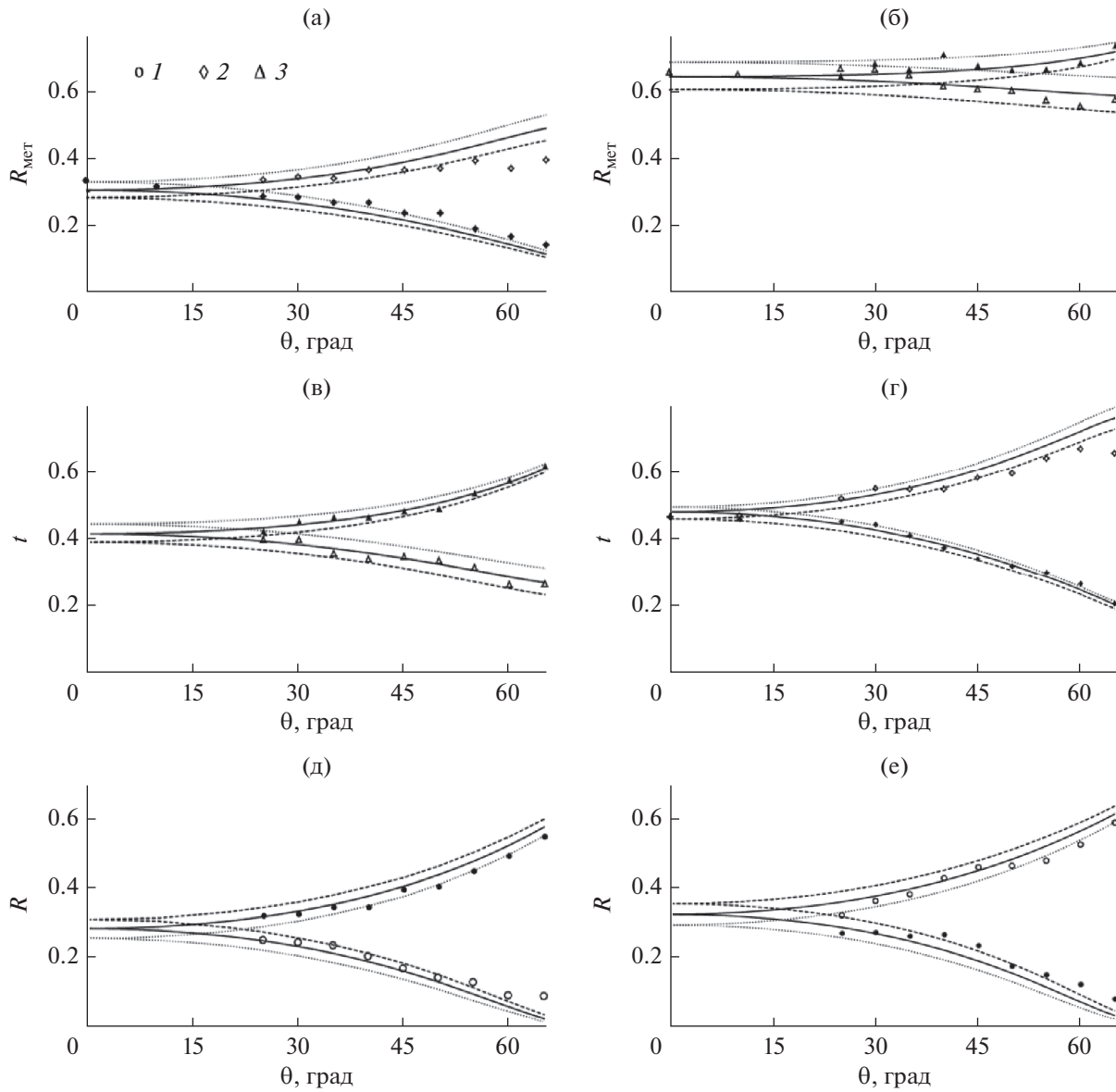
Анализ экспериментальных результатов, представленных на рис. 2–5, показывает, что при использовании радиометрического метода диэлектрические характеристики мраморных плит восстанавливаются с удовлетворительной точностью. Не исключено, что на разброс экспериментальных значений коэффициентов отражения и пропускания плит определенное влияние оказали их неоднородности. Особенно сильный разброс наблюдается на частоте 60 ГГц (см. рис. 3) при горизонтальной поляризации для образца 2. То, что разброс обусловлен влиянием неоднородностей, подтверждается взаимосвязью отклонений коэффициентов отражения и пропускания при одних и тех же углах приема, а именно: если коэффициент отражения уменьшается, то коэффициент пропускания возрастает. Таким образом, радиометрический метод позволяет контролировать однородность промышленных мраморных плит.

Из данных рис. 5, 6 следует, что показатели преломления и поглощения плит практически не

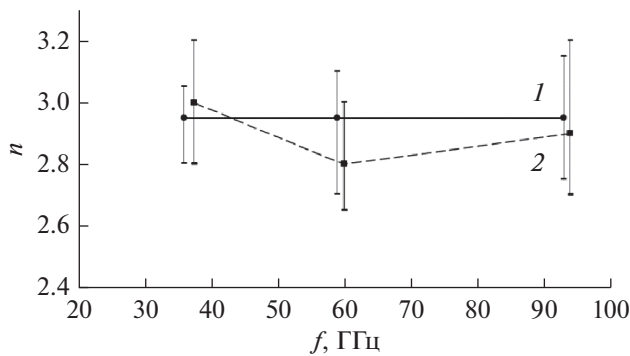
зависят от частоты, при этом показатели преломления плит имеют почти равные значения, 2.8...3, в то время как их показатели поглощения отличаются более чем в два раза. Более высокое поглощение в образце 1 может быть обусловлено более высокой концентрацией примесей, на что косвенно указывает ее крупнозернистая структура (см. табл. 2).

Полученные в результате исследования диэлектрические параметры мраморных плит представлены в табл. 3 наряду с данными для белого мрамора из других источников. Значения  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  связаны с  $n$  и  $m$  соотношениями:  $\epsilon' = n^2 - m^2$ ,  $\epsilon'' = 2nm$ .

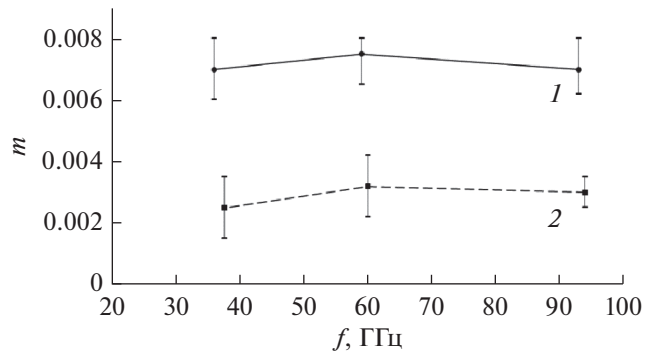
Известно [5], что диэлектрические параметры мрамора, даже белого, который рассматривается как один из самых чистых кальцитов, сильно зависят от химического состава. Из анализа данных табл. 3 следует, что экспериментальные значения  $\epsilon'$  белого мрамора на частотах от 100 Гц до 94 ГГц лежат в основном в интервале 8...9, при этом экспериментальные значения  $\epsilon''$  минимальны (и измеримы) на низких и высоких частотах. Исключением являются экспериментальные дан-



**Рис. 4.** Экспериментальные (точки) и рассчитанные по формулам (2) (сплошные линии), (3) (штриховые) и (6) (пунктирные) угловые зависимости коэффициентов отражения (1), пропускания (2) и коэффициента отражения мраморных плит на металлическом листе (3) для образцов мрамора 1 (а, в, д) и 2 (б, г, е) при вертикальной (светлые точки) и горизонтальной поляризации (темные точки) и частоте излучения 94 ГГц.



**Рис. 5.** Частотная зависимость показателя преломления мрамора для образцов 1 (1) и 2 (2).



**Рис. 6.** Частотная зависимость показателя поглощения мрамора для образцов 1 (1) и 2 (2).

**Таблица 3.** Экспериментальные диэлектрические параметры мрамора по данным разных авторов

$f$ , ГГц	$\epsilon'$	$\epsilon''$	Цвет мрамора	Литература
$10^{-7}-10^{-4}$	8.53–8.56	0.0011–0.0017	Белый	[1]
$10^{-7}-10^{-4}$	8.63–8.79	0.012	Белый	[1]
$10^{-7}-10^{-4}$	12–8	–	Белый	[2]
$10^{-4}-10^{-2}$	8	0.01–0.004	Белый	[2]
$10^{-7}-10^{-4}$	14–10	2.5–0.2	Белый	[5]
8.8–12.2	8.02	0.132	Белый	[4]
10.1	6.86	0.41	Белый (RS1)	[5]
10.1	8.03	0.27	Чисто белый (AM)	[5]
10.1	8.06	0.57	Белый (МК1)	[5]
40–50	7.2–6.8	0.055–0.07	Неизвестный	[6]
37.5	8.4–8.7	0.017–0.041	Белый	Д.р.
60	7.84–8.7	0.018–0.044	Белый	Д.р.
94	8.7–9	0.015–0.041	Белый	Д.р.

Примечание: Д.р. – данная работа.

**Таблица 4.** Экспериментальные параметры диаграммы Коула–Коула для белого мрамора в длинноволновом диапазоне [5]

Образец	$\epsilon$	$\epsilon_{\infty}$	$\alpha$	$\tau$ , мс
AM	15.7	10.6	0.68	0.54
МК1	13.45	10.1	0.52	2.63
RS1	20.15	9.6	0.68	2.82

ные, приведенные в [5]. В этой работе на основе результатов измерений диэлектрических характеристик различных видов мрамора в широком диапазоне частот были рассчитаны диаграммы Коула–Коула. Уравнение Коула–Коула имеет вид [21, 22]

$$\epsilon(\omega) = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon - \epsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}}, \quad (14)$$

где  $\epsilon$  – предельное значение на низких частотах (статическая диэлектрическая проницаемость),  $\epsilon_{\infty}$  – предельное значение на высоких частотах,  $\tau$  – время релаксации диполей,  $\alpha$  – эмпирический параметр ( $0 < \alpha < 1$ ). При  $\alpha = 0$  уравнение (14) переходит в уравнение Дебая. Для трех образцов белого мрамора, из которых самым чистым был образец AM, в [5] определены значения параметров уравнения Коула–Коула, приведенные в табл. 4. Экспериментальные значения параметра  $\alpha = 0.52...0.68$  указывают на то, что на низких частотах механизм поглощения обусловлен диполями с отличающимися временами релаксациями [21, 22].

Известно [21], что форма диаграммы Коула–Коула представляет собой дугу окружности, радиус которой  $r$  не зависит от времени релаксации:

$$r = \frac{(\epsilon - \epsilon_{\infty}) \sec(\pi\alpha/2)}{2}. \quad (15)$$

Из (15) следует, что выбор значений  $\epsilon$  и  $\epsilon_{\infty}$  или их разности может существенно влиять на моделируемую зависимость  $\epsilon''(\epsilon')$ . На высоких частотах, как отмечено выше,  $\epsilon' = 8...9$ , что ниже, чем значения  $\epsilon_{\infty}$ , указанные в табл. 4. Следовательно, на высоких частотах в сравнении с низкими частотами доминирует механизм поглощения, не связанный с дипольно-релаксационным. Существенным аргументом справедливости этого утверждения является независимость поглощения белого мрамора от частоты в миллиметровом диапазоне волн, установленная в результате выполненного исследования (рис. 6).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования диэлектрических характеристик двух плит из белого мрамора толщиной 20 мм с использованием радиометров на частотах 37.5, 60 и 94 ГГц и разработанных методик измерения коэффициентов отражения и пропускания образцов в лабораторных условиях. Обнаружено, что в диапазоне миллиметровых волн показатели преломления и поглощения белого мрамора практически не зависят от частоты излучения, при этом значения коэффициента поглощения ниже, чем на более длинных волнах. Экспериментальные результаты показали, что, используя радиометрический метод, можно достаточно эф-

фективно исследовать диэлектрические характеристики и контролировать однородность таких материалов, как мраморные плиты, без их разрушения.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую благодарность К.В. Гордееву и К.Н. Рыкову за помощь при проведении экспериментальной части работы.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Scott A.H.* // J. Research Nat. Bureau of Standards. 1940. V. 24. P. 235. RP1281. [https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/24/jresv24n3p235\\_A1b.pdf](https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/24/jresv24n3p235_A1b.pdf).
2. *Singh R.P., Singh M.P., Lal T.* // Ann. Geophys. 1980. V. 33. № 1. P. 121.
3. *Ulaby F.T., Bengal T.H., Dobson M.C. et al.* // IEEE Trans. 1990. V. GRS-28. № 3. P. 325.
4. *Vapna P.C., Joshi S.* // Int. J. Engineering and Innovative Technol. (IJEIT). 2013. V. 2. P. 180.
5. *Sengwa R.J., Sony A.* // Indian J. Pure and Appl. Phys. 2005. V. 43. P. 777.
6. *Shao Yu., Liao Xi., Wang Yang* // Proc. 2018 IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Boston, 8–13 Jul. N.Y.: 2018, P. 2003.
7. *ElShafie A., Heggy E.* // Planetary and Space Science. 2013. V. 86. P. 150.
8. *Sato K., Manabe T., Ihara T. et al.* // IEEE Trans. 1997. V. AP-45. № 12. P. 178.
9. *Xu H., Kukshya V., Rappaport T.S.* // IEEE J. Selected Areas in Commun. 2002. V. 20. № 3. P. 620.
10. *Malsev A., Maslennikov R., Sevastyanov A. et al.* // IEEE J. Selected Areas in Commun. 2009. V. 27. № 8. P. 1488.
11. *Пархоменко М.П., Калёнов Д.С., Федосеев Н.А. и др.* // РЭ. 2017. Т. 62. № 7. С. 651.
12. *Пархоменко М.П., Савельев С.В., фон Гратовски С.В.* // РЭ. 2017. Т. 62. № 3. С. 276.
13. *Пархоменко М.П., Калёнов Д.С., Федосеев Н.А. и др.* // Журн. радиоэлектроники. 2018. № 9. <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/6/text.pdf>.
14. *Пархоменко М.П., Калёнов Д.С., Еремин И.С. и др.* // РЭ. 2020. Т. 65. № 8. С. 764.
15. *Parkhomenko M.P., Kalenov D.S., Eremin I.S. et al.* // Phys. Wave Phenomena. 2019. V. 27. № 4. P. 299.
16. *Брандт А.А.* Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963.
17. *Тишер Ф.* Техника измерений на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963.
18. *Евтихов М.Г.* // Журн. радиоэлектроники. 2017. № 9. <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/11/text.pdf>.
19. *Голунов В.А.* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 38.
20. *Голунов В.А., Коротков В.А., Сухонин Е.В.* // Итоги науки и техники. сер. Радиотехника. Т. 41. М.: ВИНТИ, 1990. С. 68.
21. *Cole R.H., Cole K.S.* // J. Chem. Phys. 1941. V. 9. № 4. P. 341.
22. *Cole K.S., Cole R.H.* // J. Chem. Phys. 1942. V. 10. № 2. P. 98.