

Международный союз электросвязи

# МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.527-6  
(09/2021)

## Электрические характеристики земной поверхности

Серия Р  
Распространение радиоволн



Международный  
союз  
электросвязи

## Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

### Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

### Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
<b>P</b>	<b>Распространение радиоволн</b>
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

*Примечание.* – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация  
Женева, 2022 г.

© ITU 2022

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.527-6

## Электрические характеристики земной поверхности

(1978-1982-1992-2017-2019-2021)

**Сфера применения**

В настоящей Рекомендации приведены методы систематического моделирования электрических характеристик земной поверхности, включая чистую воду, морскую воду, лед, почву и растительный покров, при частотах до 1000 ГГц на основе оценки комплексной относительной диэлектрической проницаемости. По этим оценкам можно рассчитать проводимость во всех случаях как функцию частоты и температуры. В Прилагаемом документе к Приложению 1 приведена уже известная информация об электрических характеристиках диэлектрической проницаемости и проводимости при частотах ниже 30 МГц ввиду ее связи с Рекомендациями МСЭ-R P.368 и МСЭ-R P.832. Новый метод моделирования полностью совместим с этой более ранней информацией.

**Ключевые слова**

Комплексная диэлектрическая проницаемость, проводимость, глубина проникновения, земная поверхность, вода, растительность, почва, лед

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

*учитывая,*

- a) что электрические характеристики могут быть выражены тремя параметрами – магнитной проницаемостью  $\mu$ , диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  и электропроводностью  $\sigma$ ;
- b) что магнитную проницаемость поверхности Земли  $\mu$  обычно можно считать равной магнитной проницаемости в вакууме;
- c) что электрические свойства поверхности Земли могут быть выражены комплексной диэлектрической проницаемостью или, что то же самое, действительной и мнимой частями комплексной диэлектрической проницаемости;
- d) что необходима информация об изменении глубины проникновения радиоволн с частотой;
- e) что при моделировании распространения радиоволн необходимо знание электрических характеристик земной поверхности для нескольких целей, включая интенсивность сигнала земной волны, отражение от земли на наземном терминале, помехи между воздушными и/или космическими станциями, вызванные отражениями или рассеянием от земной поверхности, а также для применения в области наук о Земле;
- f) что в Рекомендации МСЭ-R P.368 содержатся кривые распространения земных волн в диапазоне частот от 1 МГц до 30 МГц при различных условиях земной поверхности, характеризующихся диэлектрической проницаемостью и электропроводностью;
- g) что в Рекомендации МСЭ-R P.832 содержится мировой атлас электропроводности земной поверхности для частот ниже 1 МГц,

*рекомендует*

использовать для моделирования электрических характеристик земной поверхности информацию, приведенную в Приложении 1.

## Приложение 1

### 1 Введение

В настоящем Приложении представлены методы прогнозирования электрических характеристик следующих видов земной поверхности при частотах до 1000 ГГц:

- вода;
- морская (то есть соленая) вода;
- сухой и влажный лед;
- сухая и влажная почва (сочетание песка, глины и ила);
- растительность (выше и ниже точки замерзания).

### 2 Комплексная диэлектрическая проницаемость

Характеристики поверхности Земли можно охарактеризовать тремя параметрами:

- магнитная проницаемость  $\mu$ ;
- диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$ ; и
- электропроводность<sup>1</sup>  $\sigma$ .

Магнитная проницаемость – это мера способности материала поддерживать формирование внутри себя магнитного поля в ответ на приложенное магнитное поле; то есть плотность магнитного потока  $B$ , деленная на напряженность магнитного поля  $H$ . Диэлектрическая проницаемость – это мера способности материала противостоять электрическому полю; то есть плотность электрического потока  $D$ , деленная на напряженность электрического поля  $E$ . Электропроводность – это мера способности материала проводить электрический ток; то есть отношение плотности тока в материале к напряженности электрического поля, вызвавшего этот ток.

Пусть падающая плоская волна  $\vec{E}(r, t) = \vec{E}_0 e^{j(\omega t - k \cdot r)}$  при частоте излучения  $\omega$ , времени  $t$ , магнитной проницаемости  $\mu$ , диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  и электропроводности  $\sigma$ . Тогда вектор волнового числа  $\vec{k}$  имеет величину  $k$ :

$$k = \sqrt{-j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)}. \quad (1a)$$

Значения диэлектрической проницаемости, магнитной проницаемости и электропроводности вакуума:

- диэлектрическая проницаемость вакуума:  $\varepsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12}$  (Ф/м);
- магнитная проницаемость вакуума:  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  (Н/А<sup>2</sup>);
- электропроводность вакуума:  $\sigma_0 = 0,0$  (См/м).

Удобно определить относительную диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_r$  и относительную магнитную проницаемость  $\mu_r$  по отношению к значениям этих параметров для вакуума следующим образом:

- относительная диэлектрическая проницаемость:  $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ ;
- относительная магнитная проницаемость:  $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ ,

где  $\varepsilon$  и  $\mu$  – соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемость среды. В этой Рекомендации предполагается, что  $\mu = \mu_0$ , и тогда  $\mu_r = 1$ .

Как показано в уравнении (1a), волновое число зависит как от  $\sigma$ , так и от  $\varepsilon$ , а не от каждого параметра отдельно. От значения этой комбинации зависят и другие физические параметры, описывающие различные механизмы распространения радиоволн, такие как сечение рассеяния, коэффициенты

<sup>1</sup> Она называется электропроводностью в отличие от других видов проводимости, таких как теплопроводность и гидравлическая проводимость. Далее по тексту она может называться просто проводимостью.

отражения и углы рефракции. Кроме того, квадратный корень из этой комбинации дает показатель преломления, используемый для характеристики тропосферы и ионосферы. Показатель преломления также используется для характеристики различных материалов в миллиметровом и оптическом диапазонах волн. Соответственно для упрощения формул, описывающих различные механизмы распространения, и стандартизации терминологии электрических характеристик в различных частотных диапазонах выражение  $\varepsilon - \frac{j\sigma}{\omega}$  определяется как комплексная диэлектрическая проницаемость и используется для описания электрических характеристик веществ.

Для диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ , относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_r$  и комплексной диэлектрической проницаемости, определяемой как  $\varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$ , можно записать:

$$\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - j\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}, \quad (1b)$$

где  $\varepsilon$  может быть комплексным числом.

В уравнении (1b)  $\varepsilon_r'$  – это действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости, а  $\varepsilon_r''$  – ее мнимая часть. Действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_r'$  связана с накопленной энергией, когда вещество подвергается воздействию электромагнитного поля. Мнимая часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_r''$  влияет на поглощение энергии и называется коэффициентом потерь. Знак минус в уравнении (1b) связан с электромагнитным полем, зависящим от времени как  $e^{2j\pi ft}$  ( $f$  – это частота в Гц, а  $t$  – время в секундах). При зависимости от времени  $e^{-2j\pi ft}$  знак минус (-) в уравнении (1b) заменяется знаком (+).

На частотах до 1000 ГГц рассеяние на земной поверхности объясняется либо поступательным движением зарядов (проводимостью), либо их колебательным движением (колебанием диполей) и мнимую часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_r''$  можно разложить на два члена:

$$\varepsilon_r'' = \varepsilon_d'' + \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_d''$  – рассеяние, вызванное током смещения, связанным с вибрацией диполей, а  $\frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0}$  – рассеяние, вызванное током проводимости.

Ток проводимости – это объемное перемещение свободных зарядов и единственный ток при нулевой частоте (то есть при постоянном токе). Ток проводимости больше тока смещения при частотах ниже переходной частоты  $f_t$  и меньше тока смещения при частотах выше переходной частоты  $f_t$ . Переходная частота  $f_t$  определяется как частота, при которой ток проводимости равен току смещения:

$$f_t = \frac{\sigma}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_d''}. \quad (3)$$

Для непроводящих диэлектрических материалов (без потерь)  $\sigma = 0$  и, следовательно,  $\varepsilon_r'' = \varepsilon_d''$ . Для некоторых из них, таких как сухая почва и сухая растительность,  $\varepsilon_d'' = 0$  и, следовательно,  $\varepsilon_r'' = 0$  независимо от частоты – этот случай рассматривается в пункте 2.1.2.3 Рекомендации МСЭ-R P.2040. С другой стороны, для некоторых других непроводящих материалов, таких как чистая вода и сухой снег,  $\varepsilon_d''$  и, следовательно,  $\varepsilon_r''$  равны нулю только при нулевой частоте. Соответственно пункт 2.1.2.3 Рекомендации МСЭ-R P.2040 к этим материалам неприменим.

Для проводящих диэлектрических материалов (с потерями), таких как морская вода и влажная почва, электропроводность  $\sigma$  имеет конечную величину, отличную от нуля. Соответственно по мере того как частота стремится к нулю, мнимая часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости этих веществ стремится к  $\infty$ , так что ее можно исключить из уравнения (3). В этом случае вместо мнимой части комплексной относительной диэлектрической проницаемости легче работать с проводимостью  $\sigma$ , которую можно получить из уравнения (2), приравняв  $\varepsilon_d''$  к 0:

$$\sigma = 2\pi\varepsilon_0 f \varepsilon_r'' = 0,05563 f_{\text{GHz}} \varepsilon_r'', \quad (3a)$$

где  $f_{\text{GHz}}$  – частота в ГГц. Обобщая приведенную выше формулу на другие частоты, как это сделано в уравнении (12) Рекомендации МСЭ-R P.2040, получим сумму двух слагаемых: один член дает электропроводность, а другой учитывает рассеяние мощности, связанное с током смещения.

В настоящей Рекомендации представлены методы прогнозирования действительной и мнимой частей комплексной относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r'$  и  $\epsilon_r''$ , а на сопроводительных рисунках-примерах показаны тенденции изменения действительной и мнимой частей комплексной относительной диэлектрической проницаемости с частотой при разных условиях окружающей среды.

## 2.1 Слоистая почва

Модели, приведенные в пункте 5, применимы к однородной подповерхностной почве; однако подповерхность редко бывает однородной. Скорее она состоит из множества слоев различной толщины с различными электрическими характеристиками, которые необходимо учитывать, вводя понятие эффективных параметров для представления однородной почвы. Эффективные параметры можно использовать с однородными гладкими кривыми распространения земных волн в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R P.368.

## 3 Глубина проникновения

Степень влияния нижних слоев на эффективные электрические характеристики земной поверхности зависит от глубины проникновения радиоэнергии  $\delta$ , которая определяется как глубина, на которой амплитуда напряженности поля электромагнитного излучения внутри материала падает до  $1/e$  (около 37%) от своего первоначального значения на поверхности (или, точнее, чуть ниже). Глубина проникновения  $\delta$  в однородной среде с комплексной относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$  ( $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ ) составляет:

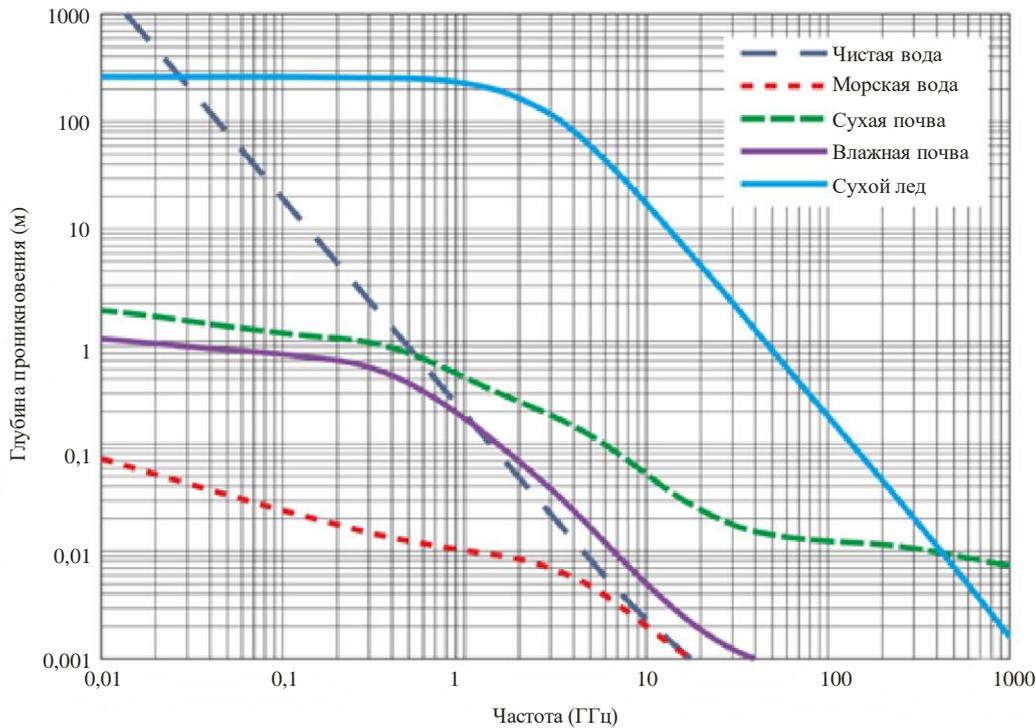
$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{(\epsilon_r')^2 + (\epsilon_r'')^2} - \epsilon_r'}} \quad (\text{м}), \quad (4)$$

где  $\lambda$  – длина волны в метрах. Заметим, что по мере того как мнимая часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости в уравнении (4) стремится к нулю, глубина проникновения стремится к бесконечности.

На рисунке 1 показаны типичные значения глубины проникновения в зависимости от частоты для разных типов поверхностных компонентов земной поверхности, включая чистую воду, морскую воду, сухую почву, влажную почву и сухой лед. Глубина проникновения чистой и морской воды рассчитывается при 20 °С, а соленость морской воды составляет 35 г/кг. Глубина проникновения в сухую и влажную почву предполагает, что объемное содержание в ней влаги составляет соответственно 0,07 и 0,5. Другие параметры почвы те же, что указаны на рисунке 7. Глубина проникновения сухого льда рассчитывается при 0 °С.

РИСУНОК 1

Глубина проникновения для разных типов поверхности в зависимости от частоты



P.0527-01

#### 4 Факторы, определяющие эффективные электрические характеристики почвы

Эффективные значения электрических характеристик почвы определяются типом почвы, ее влажностью, температурой, общей геологической структурой и частотой падающего электромагнитного излучения.

##### 4.1 Тип почвы

Хотя многочисленные измерения показывают, что значения электрических характеристик почвы варьируют в зависимости от типа почвы, это изменение может быть связано с ее способностью поглощать и удерживать влагу, а не с химическим составом почвы. Было показано, что суглинок, который обычно имеет проводимость порядка  $10^{-2}$  См/м, будучи высушенным, может иметь проводимость всего  $10^{-4}$  См/м – того же порядка, что и у гранита.

##### 4.2 Содержание влаги

Содержание влаги в почве является основным фактором, определяющим ее диэлектрическую проницаемость и проводимость. Лабораторные измерения показали, что по мере увеличения содержания влаги в почве с низких значений ее диэлектрическая проницаемость и проводимость возрастают и достигают своих максимальных значений, когда содержание влаги приближается к значениям, характерным для такой почвы. На глубине один метр и более влажность почвы на определенном участке обычно постоянна. Хотя в периоды дождя влажность может увеличиваться, после его прекращения она возвращается к своему обычному значению благодаря дренажу и испарению с поверхности.

Типичное содержание влаги в определенной почве может значительно варьировать от одного участка к другому из-за различий в общей геологической структуре, которая обеспечивает различие дренажных свойств.

### 4.3 Температура

Лабораторные измерения электрических характеристик почвы показали, что при низких частотах проводимость увеличивается примерно на 3% на градус Цельсия, а диэлектрическая проницаемость почти не зависит от температуры. В точке замерзания обычно наблюдается значительное уменьшение как проводимости, так и диэлектрической проницаемости.

### 4.4 Сезонные колебания

Влияние сезонных колебаний на электрические характеристики поверхности почвы обусловлено главным образом изменением содержания влаги и температуры верхнего слоя почвы.

## 5 Методы прогнозирования комплексной относительной диэлектрической проницаемости

В следующих пунктах представлены методы прогнозирования комплексной относительной диэлектрической проницаемости для следующих видов поверхности Земли:

- чистая вода (пункт 5.1.1);
- морская (соленая) вода (пункт 5.1.2);
- чистый лед (пункт 5.1.3.1);
- рапа морского льда (пункт 5.1.3.2);
- морской лед (однолетний и многолетний) (пункт 5.1.3.3);
- снег (сухой и влажный) (пункт 5.1.4);
- морская пена (пункт 5.1.5);
- почва (смесь песка, глины, ила и воды) (пункт 5.2);
- растительность (выше и ниже точки замерзания) (пункт 5.3).

В этом пункте используются следующие индексы при обозначении действительной и мнимой частей комплексной относительной диэлектрической проницаемости:  $p_w$  – для чистой воды,  $sw$  – для морской воды,  $ice$  – для чистого льда,  $b$  – для рапы морского льда,  $m$  – для морского льда,  $ds$  – для сухого снега,  $ws$  – для влажного снега,  $f$  – для морской пены и  $soil$  – для почвы. Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость чистой воды, морской воды, чистого льда и рапы морского льда основана на характеристиках отдельных составляющих этих видов земной поверхности, и, следовательно, значения комплексной относительной диэлектрической проницаемости морского льда, снега, морской пены, почвы и растительности получены в результате смешивания двух или более компонентов.

### 5.1 Вода

В этом пункте представлены методы прогнозирования комплексной относительной диэлектрической проницаемости чистой воды, морской воды, морской пены, льда (чистого льда, рапы морского льда и морского льда) и снега (сухого и влажного).

Выводы пунктов 5.1.1 и 5.1.2 справедливы для температур  $-4\text{ °C} \leq T \leq 40\text{ °C}$  и содержания соли  $0\text{ ppt} \leq S \leq 40\text{ ppt}$ , где ppt – количество частей на тысячу.

#### 5.1.1 Чистая вода

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость чистой воды  $\epsilon_{pw}$  зависит от частоты  $f_{GHz}$  (ГГц) и температуры  $T$  (°C):

$$\epsilon_{pw} = \epsilon'_{pw} - j \epsilon''_{pw}; \quad (5)$$

$$\epsilon'_{pw} = \frac{\epsilon_s - \epsilon_1}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_\infty}{1 + (f_{GHz}/f_2)^2} + \epsilon_\infty; \quad (6)$$

$$\epsilon''_{pw} = \frac{(f_{GHz}/f_1)(\epsilon_s - \epsilon_1)}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{(f_{GHz}/f_2)(\epsilon_1 - \epsilon_\infty)}{1 + (f_{GHz}/f_2)^2}, \quad (7)$$

где:

$$\varepsilon_s = 77,66 + 103,3\theta; \quad (8)$$

$$\varepsilon_1 = 0,0671\varepsilon_s; \quad (9)$$

$$\varepsilon_\infty = 3,52 - 7,52\theta; \quad (10)$$

$$\theta = \frac{300}{T + 273,15} - 1, \quad (11)$$

а  $f_1$  и  $f_2$  – частоты релаксации Дебая:

$$f_1 = 20,20 - 146,4\theta + 316\theta^2 \quad (\text{ГГц}); \quad (12)$$

$$f_2 = 39,8 f_1 \quad (\text{ГГц}). \quad (13)$$

### 5.1.2 Морская вода

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость морской воды  $\varepsilon_{sw}$  зависит от частоты  $f_{\text{GHz}}$  (ГГц), температуры  $T$  (°C) и солёности  $S$  (г/кг или ppt)<sup>2</sup>:

$$\varepsilon_{sw} = \varepsilon'_{sw} - j \varepsilon''_{sw}; \quad (14)$$

$$\varepsilon'_{sw} = \frac{\varepsilon_{ss} - \varepsilon_{1s}}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{1s})^2} + \frac{\varepsilon_{1s} - \varepsilon_{\infty s}}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{2s})^2} + \varepsilon_{\infty s}; \quad (15)$$

$$\varepsilon''_{sw} = \frac{(f_{\text{GHz}}/f_{1s})(\varepsilon_{ss} - \varepsilon_{1s})}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{1s})^2} + \frac{(f_{\text{GHz}}/f_{2s})(\varepsilon_{1s} - \varepsilon_{\infty s})}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{2s})^2} + \frac{18\sigma_{sw}}{f_{\text{GHz}}}, \quad (16)$$

где:

$$\varepsilon_{ss} = \varepsilon_s \exp(-3,33330 \times 10^{-3}S + 4,74868 \times 10^{-6}S^2); \quad (17)$$

$$f_{1s} = f_1 \left( 1 + S \left( \frac{2,3232 \times 10^{-3} - 7,9208 \times 10^{-5}T + 3,6764 \times 10^{-6}T^2}{+ 3,5594 \times 10^{-7}T^3 + 8,9795 \times 10^{-9}T^4} \right) \right) \quad (\text{ГГц}); \quad (18)$$

$$\varepsilon_{1s} = \varepsilon_1 \exp(-6,28908 \times 10^{-3}S + 1,76032 \times 10^{-4}S^2 - 9,22144 \times 10^{-5}TS); \quad (19)$$

$$f_{2s} = f_2 (1 + S(-1,99723 \times 10^{-2} + 1,81176 \times 10^{-4}T)) \quad (\text{ГГц}); \quad (20)$$

$$\varepsilon_{\infty s} = \varepsilon_\infty (1 + S(-2,04265 \times 10^{-3} + 1,57883 \times 10^{-4}T)). \quad (21)$$

Значения  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_\infty$ ,  $f_1$  и  $f_2$  получены из уравнений (8), (9), (10), (12) и (13). Кроме того,  $\sigma_{sw}$  определяется как:

$$\sigma_{sw} = \sigma_{35} R_{15} R_{T15} \left( \frac{C_M}{M} \right); \quad (22)$$

$$\sigma_{35} = 2,903602 + 8,607 \times 10^{-2} T + 4,738817 \times 10^{-4} T^2 - 2,991 \times 10^{-6} T^3 + 4,3047 \times 10^{-9} T^4; \quad (23)$$

$$R_{15} = S \frac{(37,5109 + 5,45216S + 1,4409 \times 10^{-2} S^2)}{(1004,75 + 182,283 S + S^2)}; \quad (24)$$

$$R_{T15} = 1 + \frac{\alpha_0(T - 15)}{(\alpha_1 + T)}; \quad (25)$$

$$\alpha_0 = \frac{(6,9431 + 3,2841S - 9,9486 \times 10^{-2} S^2)}{(84,850 + 69,024 S + S^2)}; \quad (26)$$

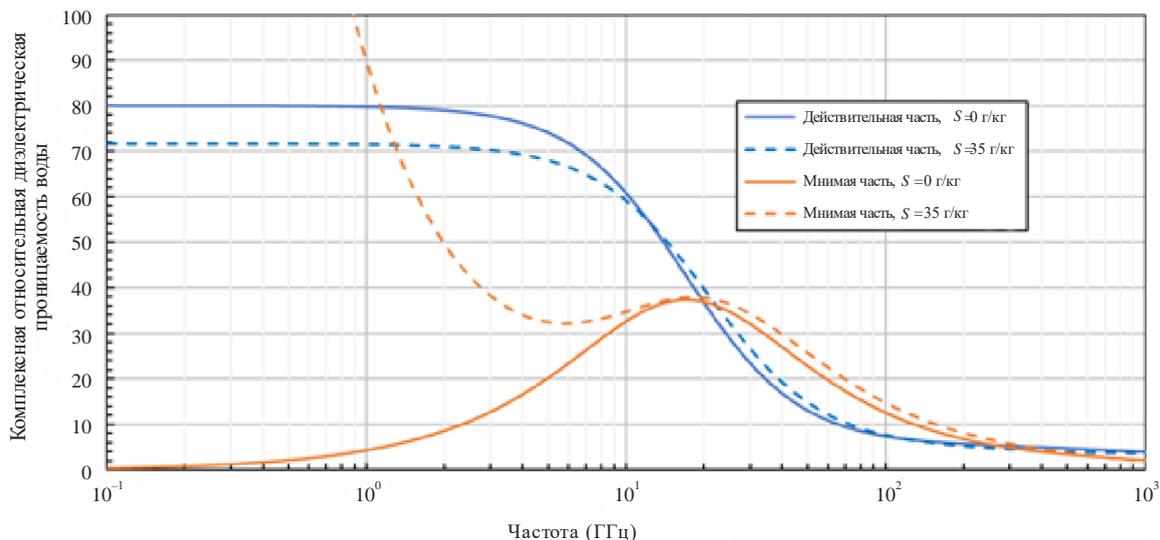
$$\alpha_1 = 49,843 - 0,2276 S + 0,198 \times 10^{-2} S^2. \quad (27)$$

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость чистой воды в уравнениях (5)–(7) является частным случаем уравнений (14)–(16), когда  $S = 0$ . Зависимость комплексной относительной диэлектрической проницаемости чистой воды ( $S = 0$  г/кг) и морской воды ( $S = 35$  г/кг) от частоты показана на рисунке 2 для  $T = 20$  °C и на рисунке 3 для  $T = 0$  °C.

<sup>2</sup> ppt означает "частей на тысячу".

РИСУНОК 2

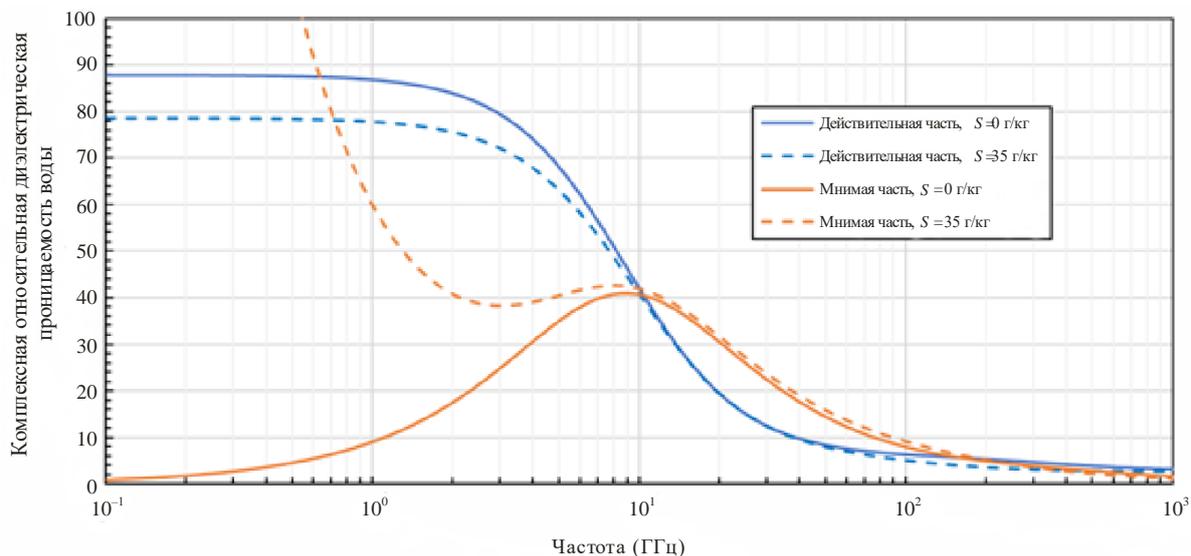
Зависимость комплексной относительной диэлектрической проницаемости чистой и морской воды от частоты ( $T = 20\text{ °C}$ )



P.0527-02

РИСУНОК 3

Зависимость комплексной относительной диэлектрической проницаемости чистой и морской воды от частоты ( $T = 0\text{ °C}$ )



P.0527-03

### 5.1.3 Лед

В данном пункте представлены методы прогнозирования комплексной относительной диэлектрической проницаемости чистого льда, рапы морского льда и морского льда.

#### 5.1.3.1 Чистый лед

Чистый лед состоит из замерзшей чистой воды ( $-60\text{ °C} \leq T_{ice} \leq 0\text{ °C}$ ). Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость чистого льда  $\epsilon_{ice}$  составляет:

$$\epsilon_{ice} = \epsilon'_{ice} - j \epsilon''_{ice}. \quad (28)$$

Действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости чистого льда  $\epsilon'_{ice}$  зависит от температуры  $T_{ice}$  (°C) и не зависит от частоты:

$$\epsilon'_{ice} = 3,1884 + 0,00091 T_{ice}, \quad (29)$$

а мнимая часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости чистого льда  $\epsilon''_{ice}$  зависит от температуры  $T_{ice}$  (°C) для частот  $f_{GHz}$  (ГГц) до 1000 ГГц:

$$\epsilon''_{ice} = \frac{A}{f_{GHz}} + B f_{GHz}, \quad (30)$$

где:

$$A = (0,00504 + 0,0062\theta)\exp(-22,1\theta); \quad (31)$$

$$B = \frac{0,0207}{T_{ice}+273,15} \frac{\exp(-\tau)}{(\exp(-\tau)-1)^2} + 1,16 \times 10^{-11} f_{GHz}^2 + \exp(-9,963 + 0,0372T_{ice}); \quad (32)$$

$$\tau = \frac{335}{T_{ice}+273,15} \quad (33)$$

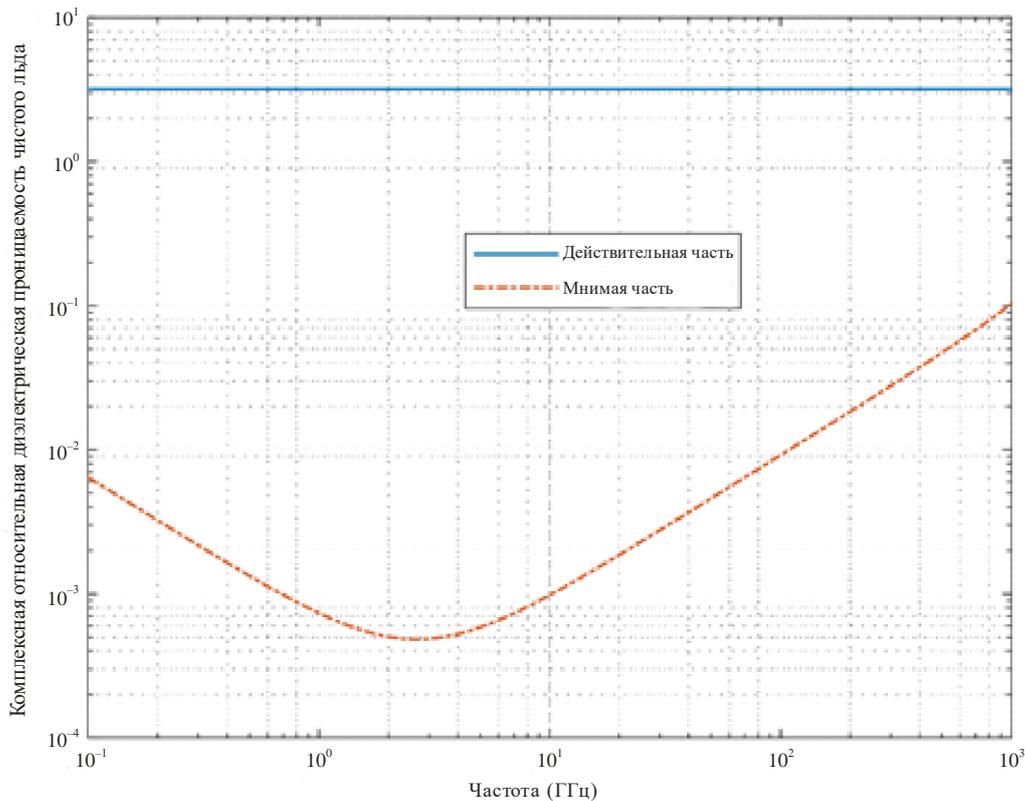
и

$$\theta = \frac{300}{T_{ice}+273,15} - 1. \quad (34)$$

Действительная ( $\epsilon'_{ice}$ ) и мнимая ( $\epsilon''_{ice}$ ) части комплексной относительной диэлектрической проницаемости чистого льда в зависимости от частоты при  $T_{ice} = 0$  °C показаны на рисунке 4.

РИСУНОК 4

Зависимость комплексной относительной диэлектрической проницаемости чистого льда от частоты ( $T_{ice} = 0$  °C)



### 5.1.3.2 Рапа морского льда

Рапа морского льда – это чистая вода с растворенными частицами соли, которая присутствует при образовании морского льда. Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость рапы морского льда  $\epsilon_b$  составляет:

$$\epsilon_b = \epsilon'_b - j\epsilon''_b. \quad (35)$$

Для температур  $-30\text{ }^\circ\text{C} \leq T_{ice} \leq -2\text{ }^\circ\text{C}$  и частот  $f_{GHz}$  (ГГц) до 1000 ГГц значения  $\epsilon'_b$  и  $\epsilon''_b$  равны:

$$\epsilon'_b = \epsilon_{b\infty} + \frac{\epsilon_{bs} - \epsilon_{b\infty}}{1 + (2\pi\tau f_{GHz})^2}; \quad (36)$$

$$\epsilon''_b = \frac{2\pi\tau f_{GHz} (\epsilon_{bs} - \epsilon_{b\infty})}{1 + (2\pi\tau f_{GHz})^2} + \frac{18\sigma_b}{f_{GHz}}, \quad (37)$$

где:

$$\epsilon_{b\infty} = \frac{82,79 + 8,19 T_{ice}^2}{15,68 + T_{ice}^2}; \quad (38a)$$

$$\epsilon_{bs} = \frac{939,66 - 19,068 T_{ice}}{10,737 - T_{ice}}; \quad (38b)$$

$$2\pi\tau = 0,10990 + 0,13603 \times 10^{-2} T_{ice} + 0,20894 \times 10^{-3} T_{ice}^2 + 0,28167 \times 10^{-5} T_{ice}^3. \quad (38c)$$

$T_{ice}$  ( $^\circ\text{C}$ ) – это температура, а  $\sigma_b$  (S/m) – проводимость, равная:

$$\sigma_b = \begin{cases} -T_{ice} \exp(0,5193 + 0,08755 T_{ice}), & T_{ice} \geq -22,9\text{ }^\circ\text{C}; \\ -T_{ice} \exp(1,0334 + 0,1100 T_{ice}), & T_{ice} < -22,9\text{ }^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (39)$$

На рисунках 5 и 6 показаны действительная ( $\epsilon'_b$ ) и мнимая ( $\epsilon''_b$ ) части комплексной относительной диэлектрической проницаемости рапы морского льда в зависимости от частоты соответственно для  $T_{ice} = -5\text{ }^\circ\text{C}$  и  $-25\text{ }^\circ\text{C}$ .

РИСУНОК 5

Зависимость комплексной относительной диэлектрической проницаемости рапы морского льда от частоты ( $T_{ice} = -5\text{ }^\circ\text{C}$ )

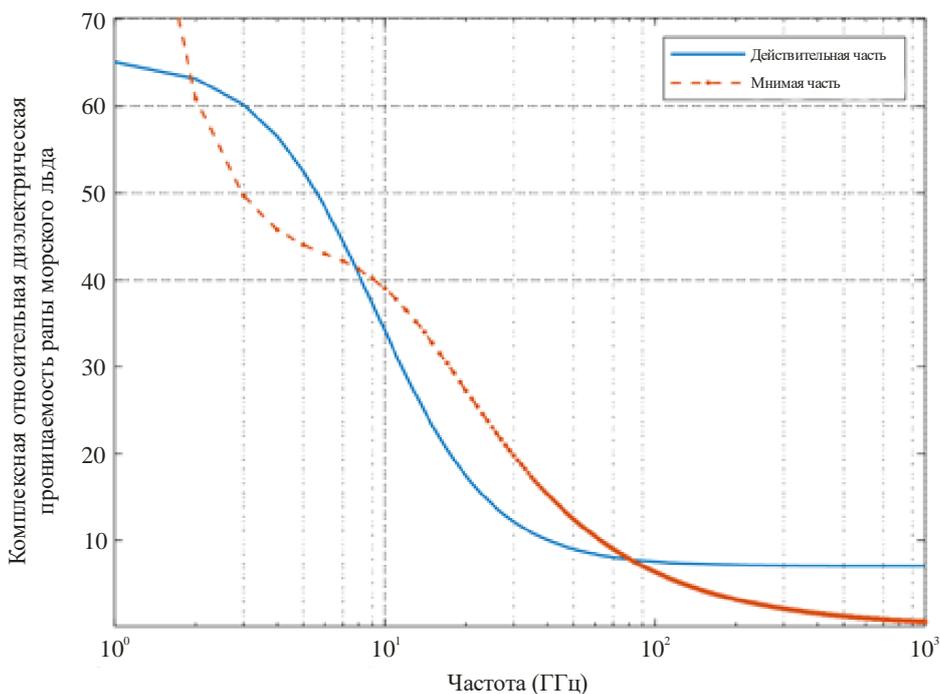
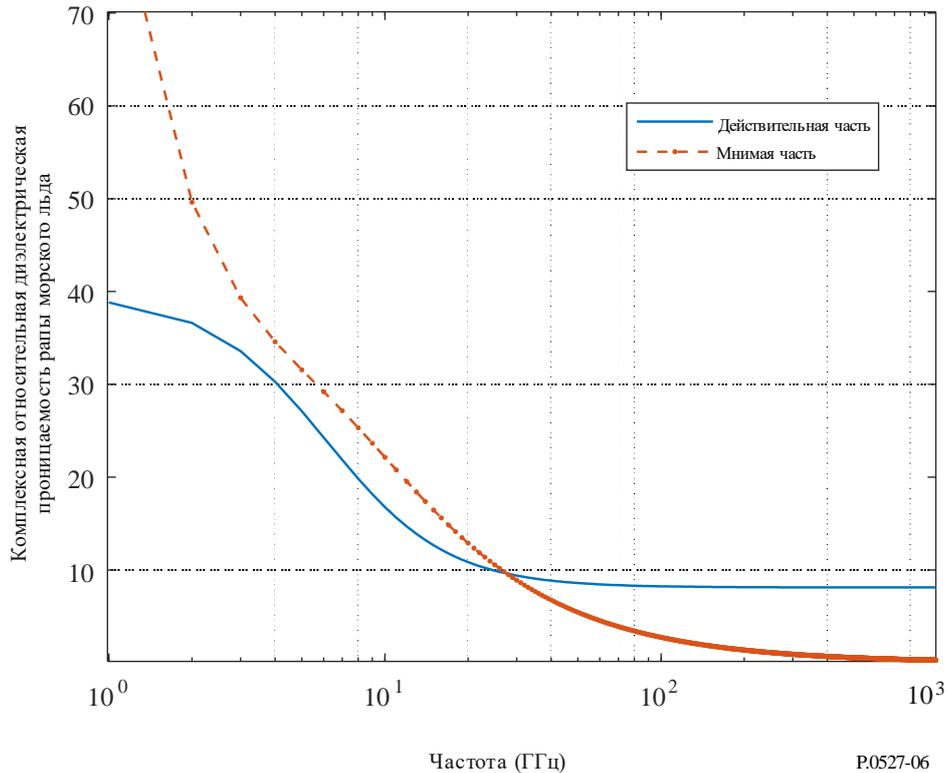


РИСУНОК 6

Зависимость комплексной относительной диэлектрической проницаемости рапы морского льда от частоты ( $T_{ice} = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



### 5.1.3.3 Морской лед

Существует морской лед двух типов: а) однолетний и б) многолетний.

Однолетний лед состоит из чистого льда и карманов с рапой, причем форма карманов с рапой зависит от того, игольчатый ли это однолетний лед или столбчатый. Игольчатый лед представляет собой совокупность рыхлых, беспорядочно ориентированных кристаллов льда игольчатой формы, а столбчатый – совокупность вертикально ориентированных кристаллов льда игольчатой формы. Максимальная толщина однолетнего льда составляет от 0,3 до 2 м.

Многолетний лед – это лед, который пережил хотя бы один сезон таяния и содержит гораздо меньше рапы и больше воздушных карманов, чем однолетний. Толщина многолетнего льда обычно составляет от 2 до 4 м, а воздушные карманы имеют сферическую форму.

Для однолетнего льда объемная доля рапы  $v_b$  определяется по формуле:

$$v_b = \frac{\rho_{ice} S_{ice}}{F_1(T_{ice}) - \rho_{ice} S_{ice} F_2(T_{ice})}, \quad (40)$$

где  $\rho_{ice}$  ( $\text{г}/\text{см}^3$ ) – плотность морского льда, определяемая по формуле:

$$\rho_{ice} = 0,917 - 1,403 \times 10^{-4} T_{ice}; \quad (41)$$

$T_{ice}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) – это температура льда,  $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{ice} \leq -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а  $S_{ice}$  (ppt) – соленость морского льда:

$$S_{ice} = \begin{cases} 7,88 - 1,59 h_{ice}, & h_{ice} > 0,3573 \text{ м;} \\ 14,24 - 19,39 h_{ice}, & h_{ice} \leq 0,3573 \text{ м,} \end{cases} \quad (42)$$

а  $h_{ice}$  (м) – его толщина.  $F_1$  и  $F_2$  рассчитываются следующим образом с использованием коэффициентов из таблицы 1:

$$F_i(T_{ice}) = \alpha_0 + \alpha_1 T_{ice} + \alpha_2 T_{ice}^2 + \alpha_3 T_{ice}^3, \quad i = 1, 2. \quad (43)$$

ТАБЛИЦА 1

Коэффициенты  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$ 

Коэффициент	$-30\text{ °C} \leq T_{ice} \leq -22,9\text{ °C}$		$-22,9\text{ °C} \leq T_{ice} \leq -2\text{ °C}$	
	$F_1(T_{ice})$	$F_2(T_{ice})$	$F_1(T_{ice})$	$F_2(T_{ice})$
$\alpha_0$	9899	8,547	-4,732	0,08903
$\alpha_1$	1309	1,089	-22,45	-0,01763
$\alpha_2$	55,27	0,04518	-0,6397	-0,000533
$\alpha_3$	0,716	0,0005819	-0,01074	-0,00008801

**5.1.3.3.1 Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость однолетнего льда**

В этом пункте представлены методы прогнозирования комплексной относительной диэлектрической проницаемости однолетнего игольчатого и столбчатого льда.

Эти методы применимы при температурах  $-30\text{ °C} \leq T_{ice} \leq -2\text{ °C}$  и частотах до 100 ГГц.

**а) Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость игольчатого морского льда**

Для игольчатого льда, в котором карманы с рапой представляют собой случайно ориентированные иглы, комплексная относительная диэлектрическая проницаемость изотропна и определяется выражением:

$$\varepsilon_m = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad (44)$$

где:

$$A = 3; \quad (45a)$$

$$B = (3 - 5v_b)(\varepsilon_b - \varepsilon_{ice}); \quad (45b)$$

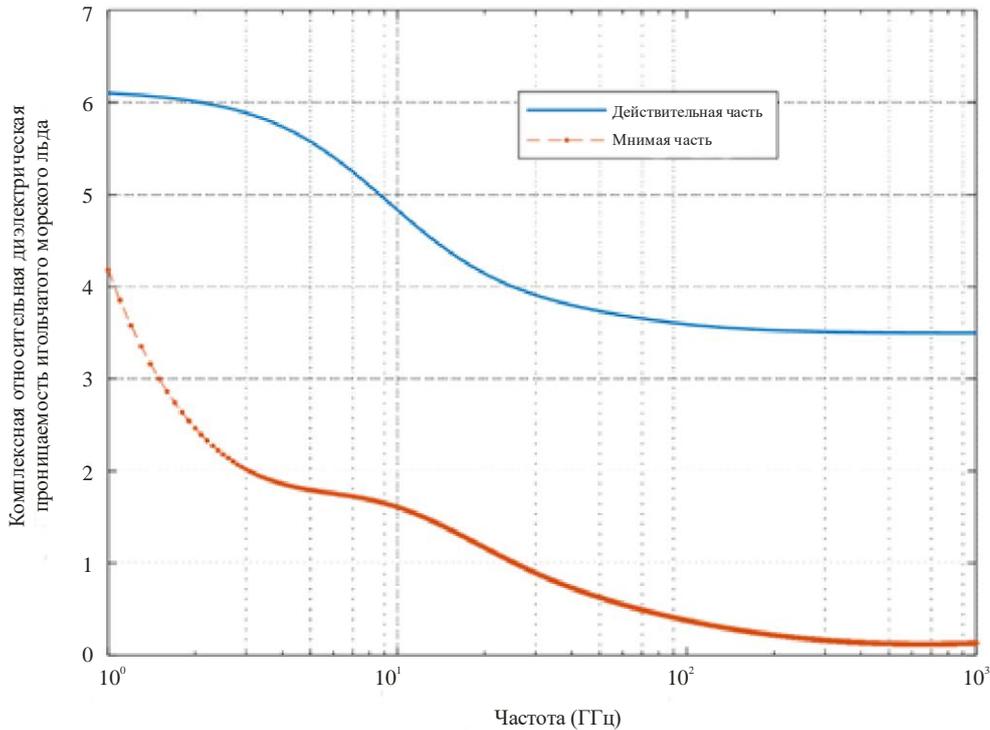
$$C = -(3 - v_b)\varepsilon_b\varepsilon_{ice} - v_b(\varepsilon_b)^2; \quad (45c)$$

$\varepsilon_{ice}$ ,  $\varepsilon_b$ , и  $v_b$  вычисляются с помощью уравнений (28), (35) и (40) соответственно.

Действительная ( $Re\{\varepsilon_m\}$ ) и мнимая ( $Im\{\varepsilon_m\}$ ) части комплексной относительной диэлектрической проницаемости однолетнего игольчатого морского льда в зависимости от частоты для  $T_{ice} -5\text{ °C}$  показаны на рисунке 7.

РИСУНОК 7

Действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости однолетнего игольчатого морского льда в зависимости от частоты ( $T_{ice} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $h_{ice} = 0,2\text{ м}$ )



P.0527-07

### б) Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость столбчатого льда

Для столбчатого льда, в котором карманы с рапой представляют собой вертикально ориентированные иглы, комплексная относительная диэлектрическая проницаемость анизотропна. Компоненты  $\epsilon_{mx}$ ,  $\epsilon_{my}$  и  $\epsilon_{mz}$ , когда оси  $x$  и  $y$  параллельны поверхности Земли, а ось  $z$  перпендикулярна поверхности Земли, определяются следующим образом:

$$\epsilon_{mx} = \epsilon_{my} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}; \quad (46)$$

$$\epsilon_{mz} = \epsilon_{ice} + \nu_b (\epsilon_b - \epsilon_{ice}), \quad (47)$$

где:

$$A = 1; \quad (48a)$$

$$B = (1 - 2\nu_b)(\epsilon_b - \epsilon_{ice}); \quad (48b)$$

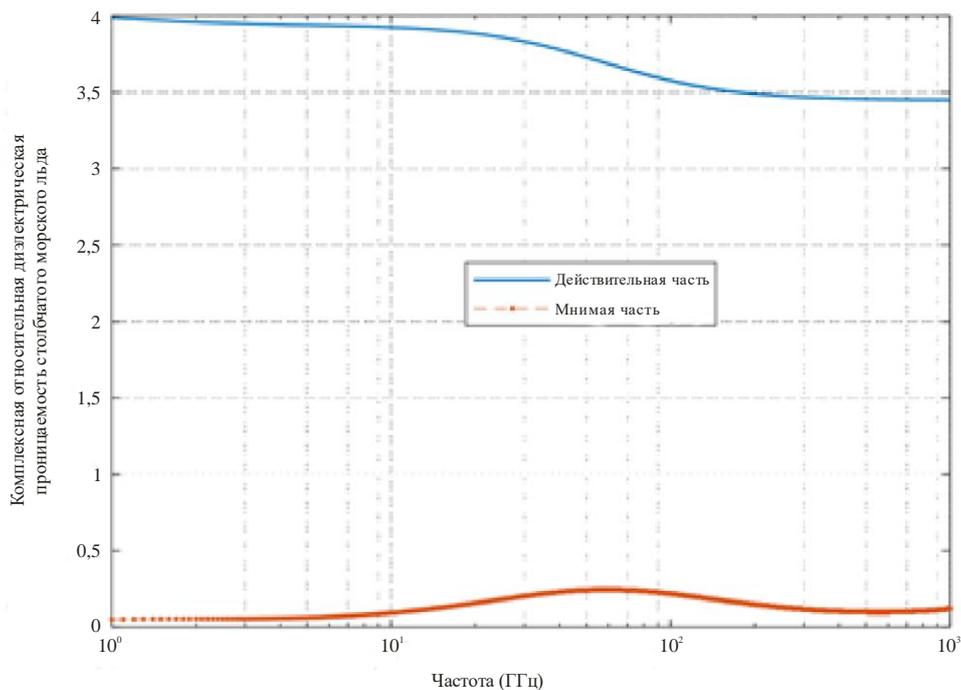
$$C = -\epsilon_b \epsilon_{ice}; \quad (48c)$$

$\epsilon_{ice}$ ,  $\epsilon_b$  и  $\nu_b$  вычисляются с помощью уравнений (28), (35) и (40) соответственно.

Действительная ( $Re\{\epsilon_{mx,y}\}$ ) и мнимая ( $Im\{\epsilon_{mx,y}\}$ ) части комплексной относительной диэлектрической проницаемости столбчатого морского льда в зависимости от частоты для  $T_{ice} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в горизонтальной плоскости (оси  $x$ ,  $y$ ) показаны на рисунке 8, а действительная ( $Re\{\epsilon_{mz}\}$ ) и мнимая ( $Im\{\epsilon_{mz}\}$ ) части комплексной относительной диэлектрической проницаемости столбчатого морского льда в зависимости от частоты для  $T_{ice} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в вертикальном направлении (ось  $z$ ) – на рисунке 9.

РИСУНОК 8

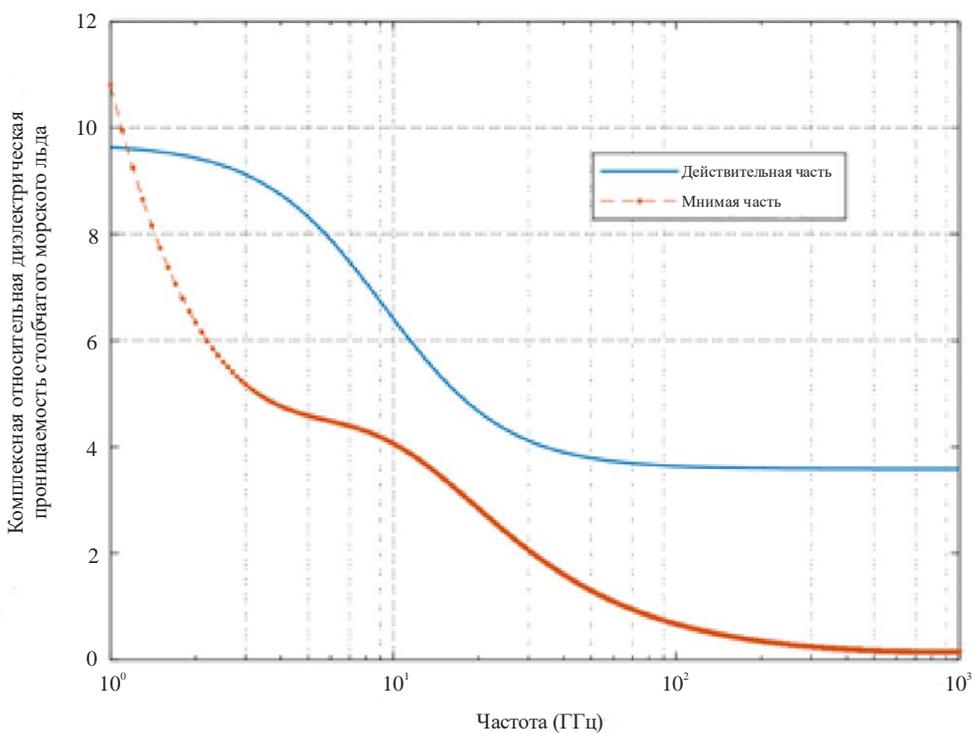
Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость однолетнего столбчатого морского льда в горизонтальной плоскости (оси  $x, y$ ) в зависимости от частоты ( $T_{ice} = -5^\circ\text{C}$  и  $h_{ice} = 0,2\text{ м}$ )



P.0527-08

РИСУНОК 9

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость однолетнего столбчатого морского льда в вертикальном (ось  $z$ ) направлении в зависимости от частоты ( $T_{ice} = -5^\circ\text{C}$  и  $h_{ice} = 0,2\text{ м}$ )



P.0527-09

### 5.1.3.3.2 Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость многолетнего льда

Для многолетнего льда, который представляет собой смесь чистого льда и сферических воздушных карманов, комплексная относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_m$  является изотропной и определяется выражением:

$$\epsilon_m = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad (49)$$

где:

$$A = 2; \quad (50a)$$

$$B = 1 - 2\epsilon_{ice} - 3\nu_a(1 - \epsilon_{ice}); \quad (50b)$$

$$C = -\epsilon_{ice}, \quad (50c)$$

$\epsilon_{ice}$  – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость чистого льда, определяемая уравнением (28), а  $\nu_a$  – объемная доля воздуха.

Приведенный выше метод прогнозирования комплексной относительной диэлектрической проницаемости применим при температурах  $-30\text{ °C} \leq T \leq -2\text{ °C}$  и частотах до 100 ГГц.

### 5.1.4 Снег

Методы прогнозирования комплексной относительной диэлектрической проницаемости, описанные в этом разделе, применимы при температурах  $-60\text{ °C} \leq T \leq 0\text{ °C}$  и частотах до 100 ГГц.

#### 5.1.4.1 Сухой снег

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость сухого снега  $\epsilon_{ds}$  равна:

$$\epsilon_{ds} = \epsilon'_{ds} - j\epsilon''_{ds}, \quad (51)$$

где:

$$\epsilon'_{ds} = \begin{cases} 1 + 1,9\rho_{ds}, & \rho_{ds} \leq 0,5 \text{ г/см}^3; \\ 0,51 + 2,88\rho_{ds}, & \rho_{ds} \geq 0,5 \text{ г/см}^3; \end{cases} \quad (52)$$

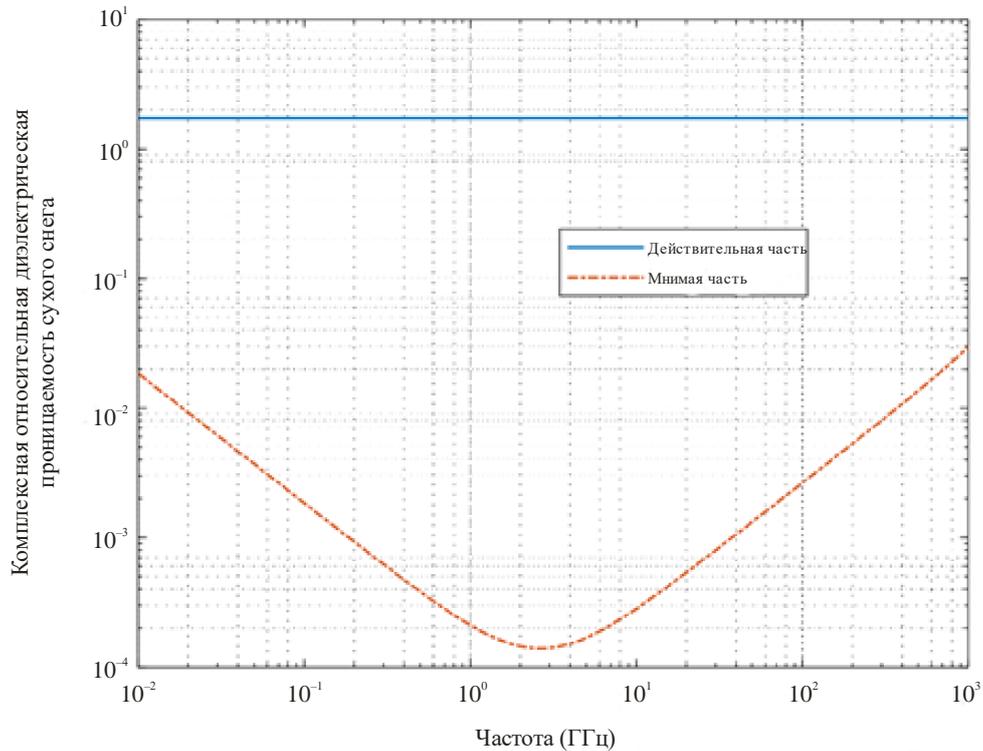
$$\epsilon''_{ds} = 3\epsilon''_{ice} f_{ice} \frac{(\epsilon'_{ds})^2(2\epsilon'_{ds}+1)}{(\epsilon'_{ice}+2\epsilon'_{ds})[\epsilon'_{ice} + 2(\epsilon'_{ds})^2]}, \quad (53)$$

$\rho_{ds}$  – это плотность сухого снега в  $\text{г/см}^3$ , а  $f_{ice} = \rho_{ds}/\rho_{ice}$ , где  $\rho_{ice} = 0,916 \text{ г/см}^3$ .

Зависимость действительной ( $\epsilon'_{ds}$ ) и мнимой ( $\epsilon''_{ds}$ ) частей комплексной относительной диэлектрической проницаемости сухого снега от частоты при  $\rho_{ds} = 0,4 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_{ice} = 0,916 \text{ г/см}^3$  и  $T_{ice} = -10\text{ °C}$  показана на рисунке 10.

РИСУНОК 10

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость сухого снега  
в зависимости от частоты  
( $\rho_{ds} = 0,4 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_{ice} = 0,916 \text{ г/см}^3$  и  $T_{ice} = -10 \text{ °C}$ )



P.0527-10

#### 5.1.4.2 Влажный снег

Влажный снег представляет собой смесь сухого снега и чистой воды. Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость влажного снега  $\epsilon_{ws}$  равна:

$$\epsilon_{ws} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad (54)$$

где:

$$A = 2; \quad (55a)$$

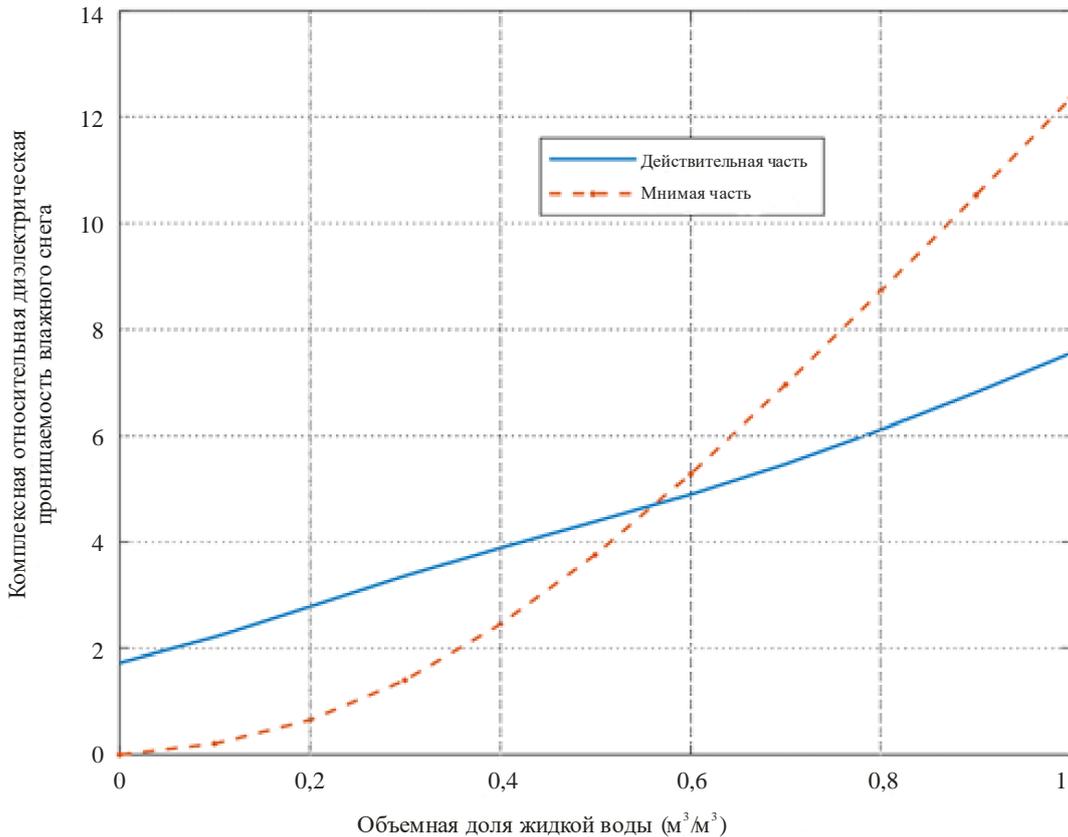
$$B = \epsilon_{pw} - 2\epsilon_{ds} - 3F_{wc}(\epsilon_{pw} - \epsilon_{ds}); \quad (55b)$$

$$C = -\epsilon_{pw}\epsilon_{ds}. \quad (55c)$$

$F_{wc}$  ( $0 \leq F_{wc} \leq 1$ ) – объемная доля жидкой воды ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ );  $\epsilon_{pw}$  и  $\epsilon_{ice}$  – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость чистой воды и сухого снега из уравнений (5) и (51) соответственно. Действительная ( $Re\{\epsilon_{ws}\}$ ) и мнимая ( $Im\{\epsilon_{ws}\}$ ) части комплексной относительной диэлектрической проницаемости влажного снега в зависимости от объемной доли жидкой воды для  $f_{GHz} = 60$  ГГц и  $T = 0 \text{ °C}$  показаны на рисунке 11.

РИСУНОК 11

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость влажного снега  
в зависимости от объемной доли жидкой воды  
( $f_{GHz} = 60$  ГГц и  $T = 0$  °С)



P.0527-11

### 5.1.5 Морская пена

Морская пена, образующаяся в результате взбалтывания морской воды прибрежным прибоем, состоит из морской воды и захваченных пузырьков воздуха. Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость морской пены  $\epsilon_f$  равна:

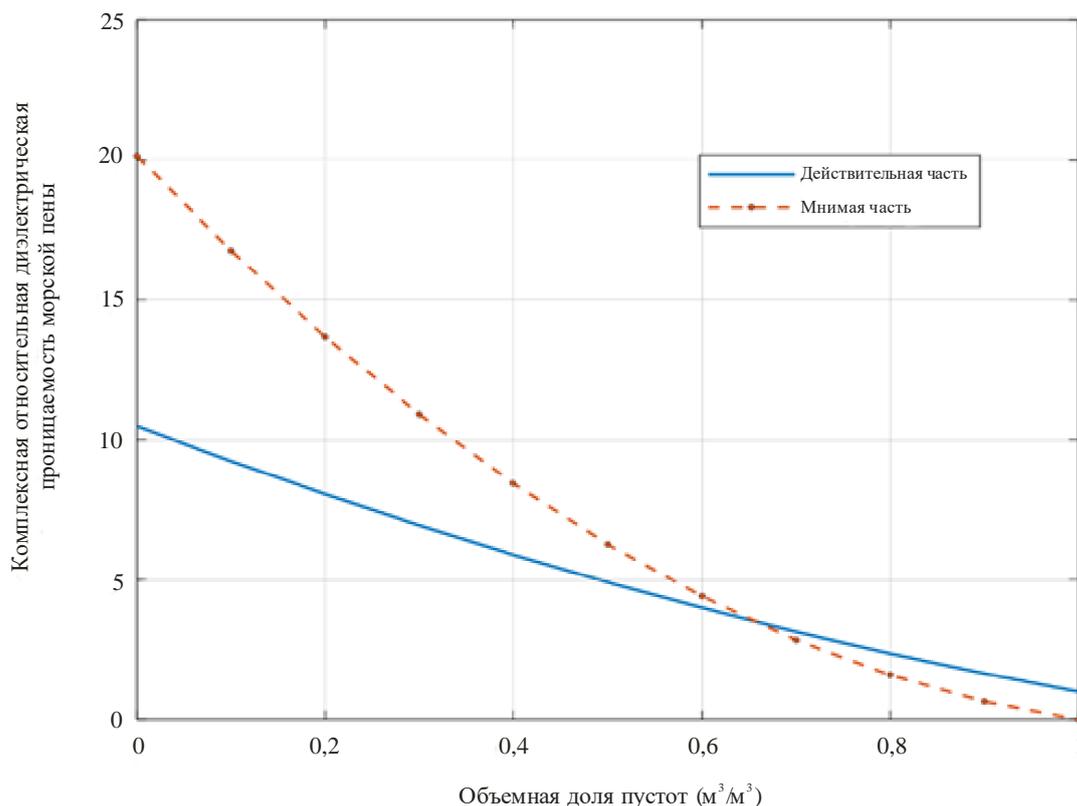
$$\epsilon_f = (f_a + (1 - f_a) \sqrt{\epsilon_{sw}})^2, \quad (56)$$

где  $f_a$  ( $0 \leq f_a \leq 1$ ) – объемная доля пустот, а  $\epsilon_{sw}$  – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость морской воды из уравнения (14). Объемная доля пустот ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ ), отношение объема пузырьков воздуха к общему объему, имеет максимальное значение на границе воздух–пена и минимальное значение на границе пена – морская вода. Метод прогнозирования комплексной относительной диэлектрической проницаемости (56) применим при температурах  $-4$  °С  $\leq T \leq 40$  °С и частотах до 100 ГГц.

Действительная ( $Re\{\epsilon_f\}$ ) и мнимая ( $Im\{\epsilon_f\}$ ) части комплексной относительной диэлектрической проницаемости морской пены в зависимости от объемной доли пустот для  $f_{GHz} = 60$  ГГц,  $S = 35$  ppt и  $T = 20$  °С показаны на рисунке 12.

РИСУНОК 12

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость морской пены  
в зависимости от объемной доли пустот  
( $f_{GHz} = 60$  ГГц,  $T = 20$  °C и  $S = 35$  ppt)



P.0527-12

## 5.2 Почва

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость почвы  $\epsilon_{soil}$  зависит от частоты  $f_{GHz}$  (ГГц), температуры  $T$  (°C), состава почвы и объемного содержания воды.

Состав почвы характеризуется процентным содержанием по объему следующих сухих компонентов почвы, известным из полевых исследований и лабораторного анализа: а)  $P_{sand}$  = % песка, б)  $P_{clay}$  = % глины и с)  $P_{silt}$  = % ила.

Состав почвы также характеризуется: а) удельным весом (то есть массовой плотностью почвы, деленной на массовую плотность воды) сухой смеси составляющих почвы  $\rho_s$  (г/см<sup>3</sup>); б) объемным содержанием влаги  $m_v$  (то есть объемом воды, деленным на общий объем почвы для данного образца почвы (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>)); и с) объемной плотностью почвы  $\rho_b$  (г/см<sup>3</sup>) (то есть массой почвы в данном объеме). Его трудно измерить напрямую, но можно получить из процентного содержания сухих компонентов. Если локальная функция псевдопреобразования недоступна, можно использовать следующую эмпирическую функцию псевдопреобразования:

$$\rho_b = 1,07256 + 0,078886 \ln(P_{sand}) + 0,038753 \ln(P_{clay}) + 0,032732 \ln(P_{silt}). \quad (57)$$

Если процентное содержание составляющей меньше 1%, то соответствующий член в уравнении (57) следует опустить. Сумма процентного содержания составляющих должна быть равна 100%.

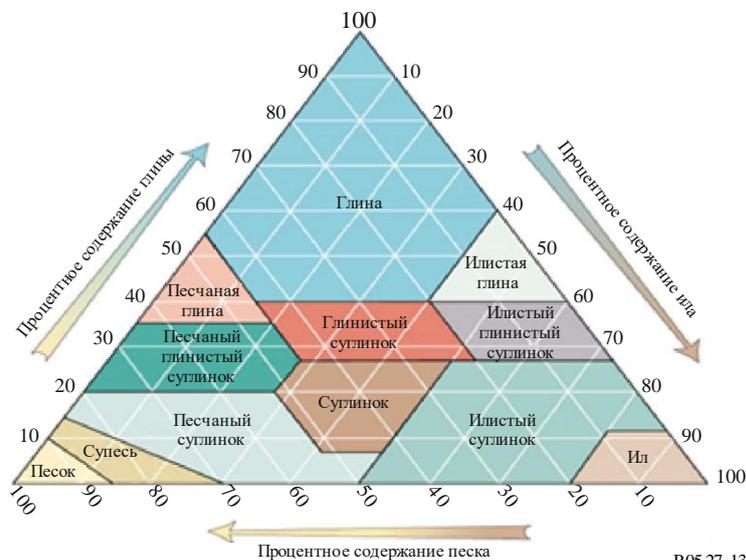
Температуру почвы и объемное содержание воды можно получить из глобальных карт, предоставленных космическими системами дистанционного зондирования, а структуру почвы — из геологических баз данных, таких как HWSD1.21 (Harmonized World Soil Databases, версия 1.21) и GLDAS (Global Land Data Assimilation System). При отсутствии местных данных можно использовать таблицу 2.

В таблице 2 приведены типичные значения процентного содержания составляющих, удельного веса и объемной плотности для четырех основных типов почвы.

ТАБЛИЦА 2  
Физические параметры почвы разного типа

Структурный класс почвы	1 Песчаный суглинок	2 Суглинок	3 Илистый суглинок	4 Илистая глина
% песка	51,52	41,96	30,63	5,02
% глины	13,42	8,53	13,48	47,38
% ила	35,06	49,51	55,89	47,60
$\rho_s$	2,66	2,70	2,59	2,56
$\rho_b$ (г/см <sup>-3</sup> )	1,6006	1,5781	1,5750	1,4758

РИСУНОК 13  
Треугольник структуры почвы



Структурный класс почвы, указанный в первой строке таблицы 2, основан на треугольнике структуры почвы, изображенном на рисунке 13.

При данном методе прогнозирования почва рассматривается как смесь четырех компонентов: а) частиц почвы, состоящих из глины, песка и ила; б) воздуха; в) связанной воды (воды, связанной с частицами почвы такими силами, как поверхностное натяжение, когда толщина слоя воды и его диэлектрическая постоянная и частоты релаксации неизвестны); и д) свободной воды (или текучей воды, которая свободно течет в пустотах почвы). Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость почвы  $\epsilon_{soil}$  этой четырехкомпонентной смеси:

$$\epsilon_{soil} = \epsilon'_{soil} - j\epsilon''_{soil}, \quad (58)$$

где:

$$\epsilon'_{soil} = \left[ 1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\{\epsilon'_{sm}\}^\alpha - 1) + m_v^{\beta'} (\epsilon'_{fw})^\alpha - m_v \right]^{1/\alpha}; \quad (59)$$

$$\varepsilon''_{soil} = \left[ m_v^{\beta''} (\varepsilon''_{fw})^\alpha \right]^{1/\alpha}; \quad (60)$$

$$\varepsilon'_{sm} = (1,01 + 0,44 \rho_s)^2 - 0,062; \quad (61)$$

$$\beta' = 1,2748 - 0,00519 P_{sand} - 0,00152 P_{clay}; \quad (62)$$

$$\beta'' = 1,33797 - 0,00603 P_{sand} - 0,00166 P_{clay} \quad (63)$$

и

$$\alpha = 0,65; \quad (64)$$

$\varepsilon'_{fw}$  и  $\varepsilon''_{fw}$  – действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости воды:

$$\varepsilon'_{fw} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_1}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty}{1 + (f_{GHz}/f_2)^2} + \varepsilon_\infty + \frac{18 \sigma'_{eff} (\rho_s - \rho_b)}{f_{GHz} \rho_s m_v}; \quad (65)$$

$$\varepsilon''_{fw} = \frac{(f_{GHz}/f_1)(\varepsilon_s - \varepsilon_1)}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{(f_{GHz}/f_2)(\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty)}{1 + (f_{GHz}/f_2)^2} + \frac{18 \sigma''_{eff} (\rho_s - \rho_b)}{f_{GHz} \rho_s m_v}, \quad (66)$$

где  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_\infty$ ,  $f_1$  и  $f_2$  получены из уравнений (8), (9), (10), (12) и (13), а  $\sigma'_{eff}$  и  $\sigma''_{eff}$  составляют:

$$\sigma'_{eff} = (f_{GHz}/1,35) \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{1 + (f_{GHz}/1,35)^2} \right); \quad (67)$$

$$\sigma''_{eff} = \sigma_2 + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{1 + (f_{GHz}/1,35)^2} \quad (68)$$

и

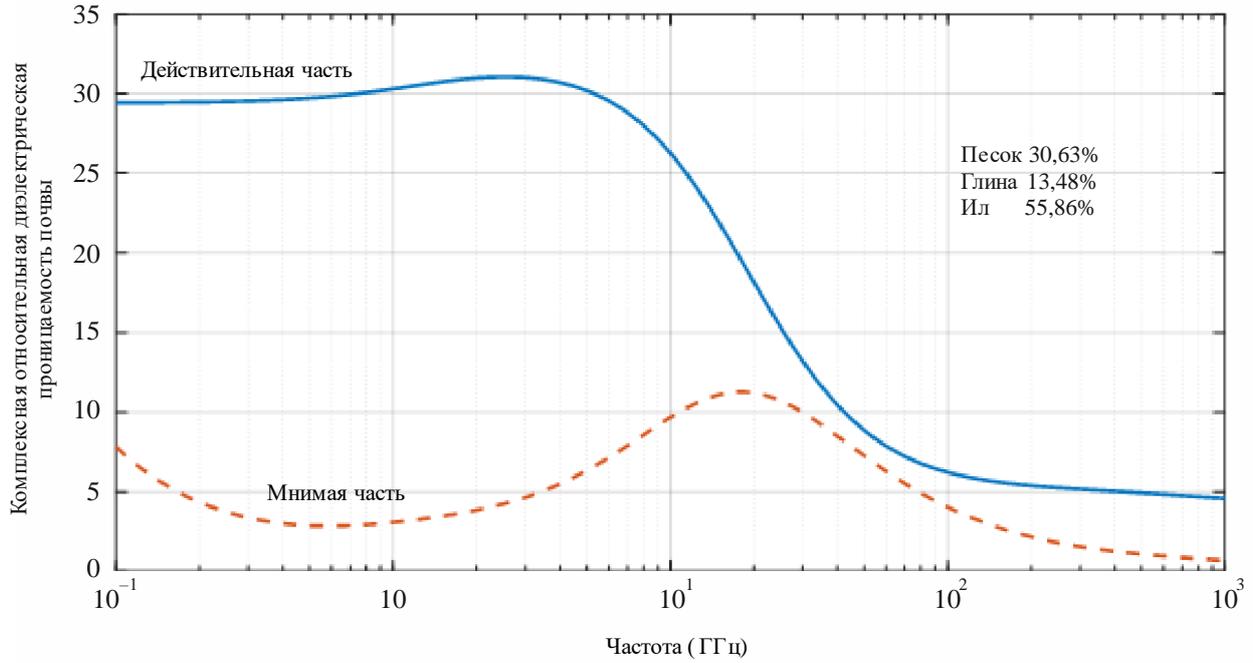
$$\sigma_1 = 0,0467 + 0,2204 \rho_b - 0,004111 P_{sand} - 0,006614 P_{clay}; \quad (69)$$

$$\sigma_2 = -1,645 + 1,939 \rho_b - 0,0225622 P_{sand} + 0,01594 P_{clay}. \quad (70)$$

На рисунках 14, 15 и 16 приведены примеры комплексной относительной диэлектрической проницаемости почвы двух типов. На рисунках 14 и 16 состав почвы идентичен, за исключением объемного содержания воды, что указывает на то, что как действительная, так и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости непосредственно связаны с объемным содержанием воды.

РИСУНОК 14

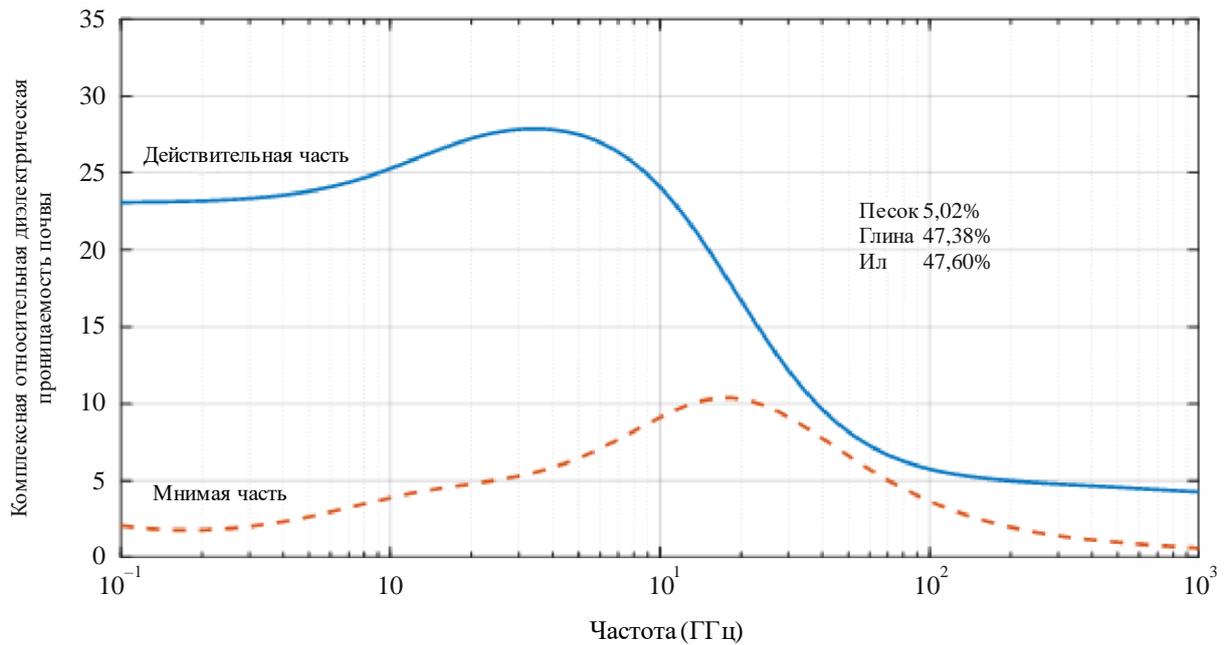
Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость илесто-суглинистой почвы в зависимости от частоты  
 ( $m_v = 0,5$ ,  $T = 23$  °C,  $\rho_s = 2,59$ ,  $\rho_b = 1,5750$  г/см<sup>3</sup>)



P.0527-14

РИСУНОК 15

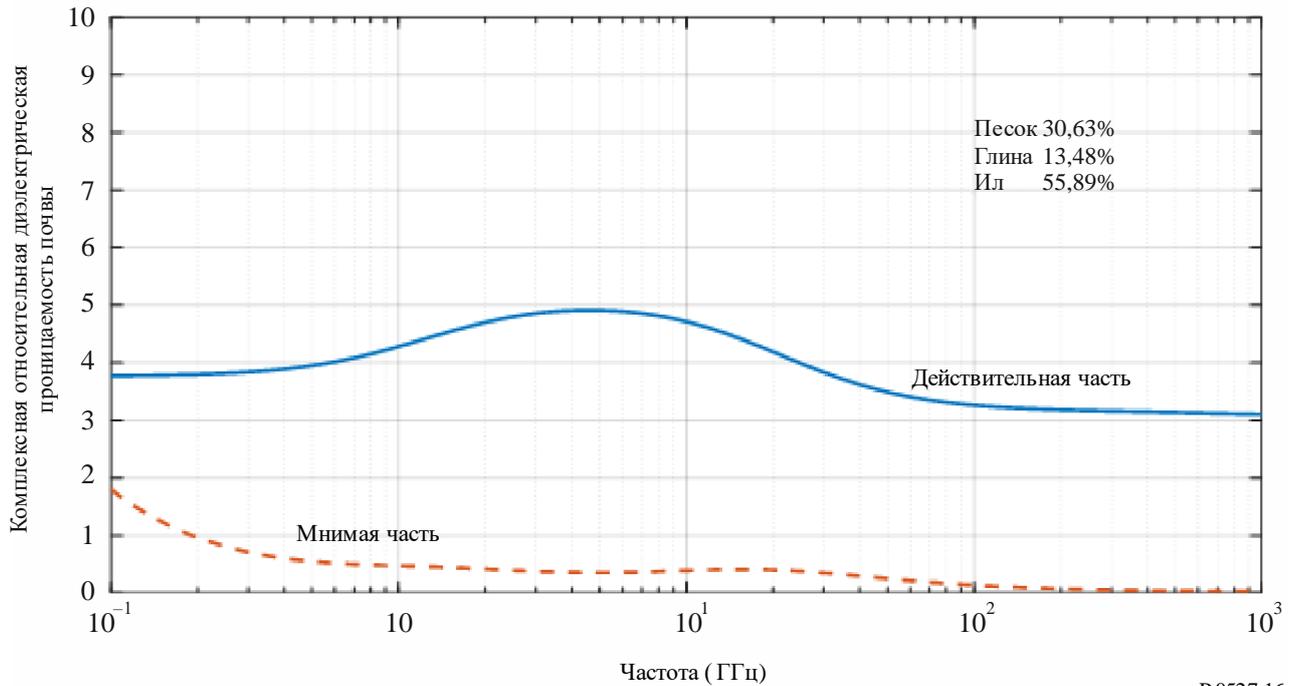
Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость илесто-глинистой почвы в зависимости от частоты  
 ( $m_v = 0,5$ ,  $T = 23$  °C,  $\rho_s = 2,56$ ,  $\rho_b = 1,4758$  г/см<sup>3</sup>)



P.0527-15

РИСУНОК 16

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость илисто-суглинистой почвы в зависимости от частоты ( $m_v = 0,07$ ,  $T = 23$  °C,  $\rho_s = 2,59$ ,  $\rho_b = 1,5750$  г/см<sup>3</sup>)



### 5.3 Растительность

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость растительности зависит от частоты  $f_{\text{GHz}}$  (ГГц), температуры  $T$  (°C) и весового содержания воды в растительности  $M_g$ , которое определяется как:

$$M_g = \frac{M_{mv} - M_{dv}}{M_{mv}}. \quad (71)$$

$M_{mv}$  – это вес влажной растительности, а  $M_{dv}$  – вес сухой растительности. Значение  $M_g$  находится между 0,0 и 0,7.

При этом методе прогнозирования растительность рассматривается как смесь объемной растительности, свободной соленой воды, связанной воды и льда (в соответствующих случаях). Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость этой смеси определяется формулой:

$$\varepsilon_v = \varepsilon'_v - j \varepsilon''_v. \quad (72)$$

Действительная часть  $\varepsilon'_v$  и мнимая часть  $\varepsilon''_v$  комплексной относительной диэлектрической проницаемости растительности приведены в пункте 5.3.1 для температур выше точки замерзания и в пункте 5.3.2 для температур ниже точки замерзания.

#### 5.3.1 Температуры выше точки замерзания

При температурах выше точки замерзания ( $T > 0$  °C) действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости растительности равны:

$$\varepsilon'_v = \varepsilon_{dv} + v_{fw} \left[ \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_1)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_1)^2} + \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_2)^2} \right] + v_{bw} \left[ 2,9 + \frac{55[1 + \sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,02f_1)}]}{1 + 2\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,02f_1)} + (f_{\text{GHz}}/0,01f_1)} \right]; \quad (73)$$

$$\varepsilon''_v = v_{fw} \left[ \frac{(f_{\text{GHz}}/f_1)(\varepsilon_s - \varepsilon_1)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_1)^2} + \frac{(f_{\text{GHz}}/f_2)(\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_2)^2} + \frac{22,86}{f_{\text{GHz}}} \right] + v_{bw} \left[ \frac{55\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,02f_1)}}{1 + 2\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,02f_1)} + (f_{\text{GHz}}/0,01f_1)} \right], \quad (74)$$

где  $\varepsilon_{dv}$  – действительная часть относительной диэлектрической проницаемости объемной растительности,  $v_{fw}$  – объемная доля свободной воды и  $v_{bw}$  – объемная доля связанной воды, причем:

$$\varepsilon_{dv} = 1,7 - 0,74 M_g + 6,16 M_g^2; \quad (75)$$

$$v_{fw} = M_g(0,55 M_g - 0,076); \quad (76)$$

$$v_{bw} = \frac{4,64 M_g^2}{(1+7,36 M_g^2)}. \quad (77)$$

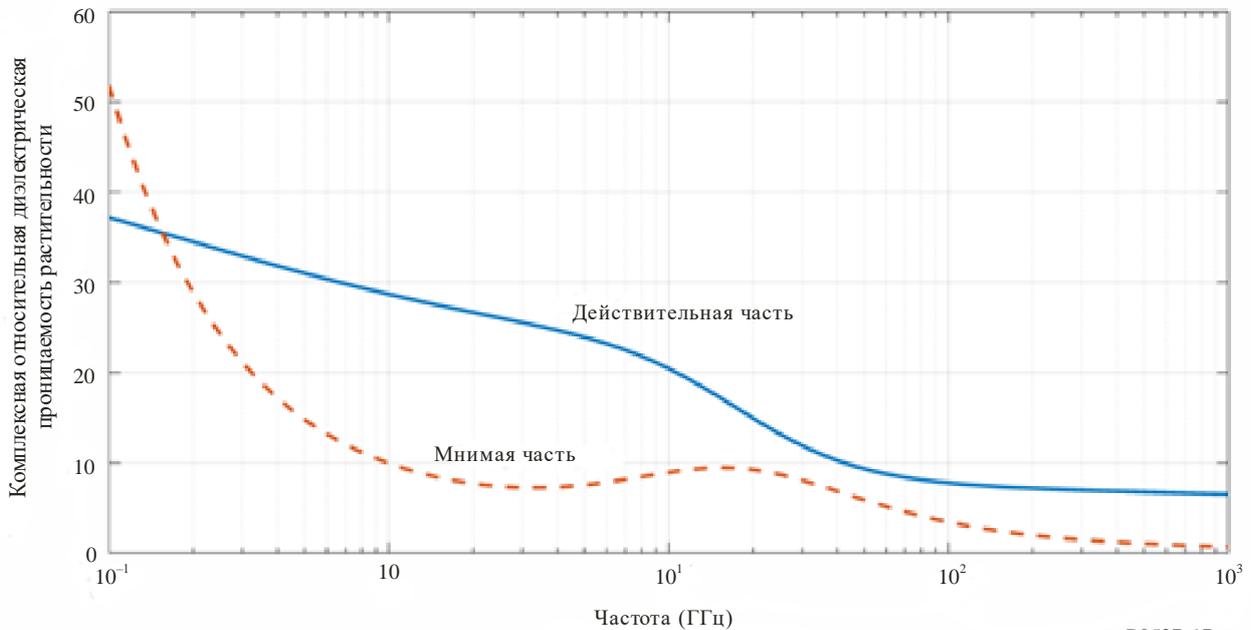
Значения  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_\infty$ ,  $f_1$  и  $f_2$  получены соответственно из уравнений (8), (9), (10), (12) и (13).

Уравнения (73) и (74) носят более общий характер, чем уравнение (16) из Рекомендации МСЭ-R P.833, поскольку они учитывают как свободную, так и связанную воду и включают температурную зависимость.

На рисунках 17 и 18 показаны действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости растительности в зависимости от частоты при двух разных значениях весового содержания воды. Они демонстрируют, что с увеличением весового содержания воды как действительная, так и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости растительности возрастают.

РИСУНОК 17

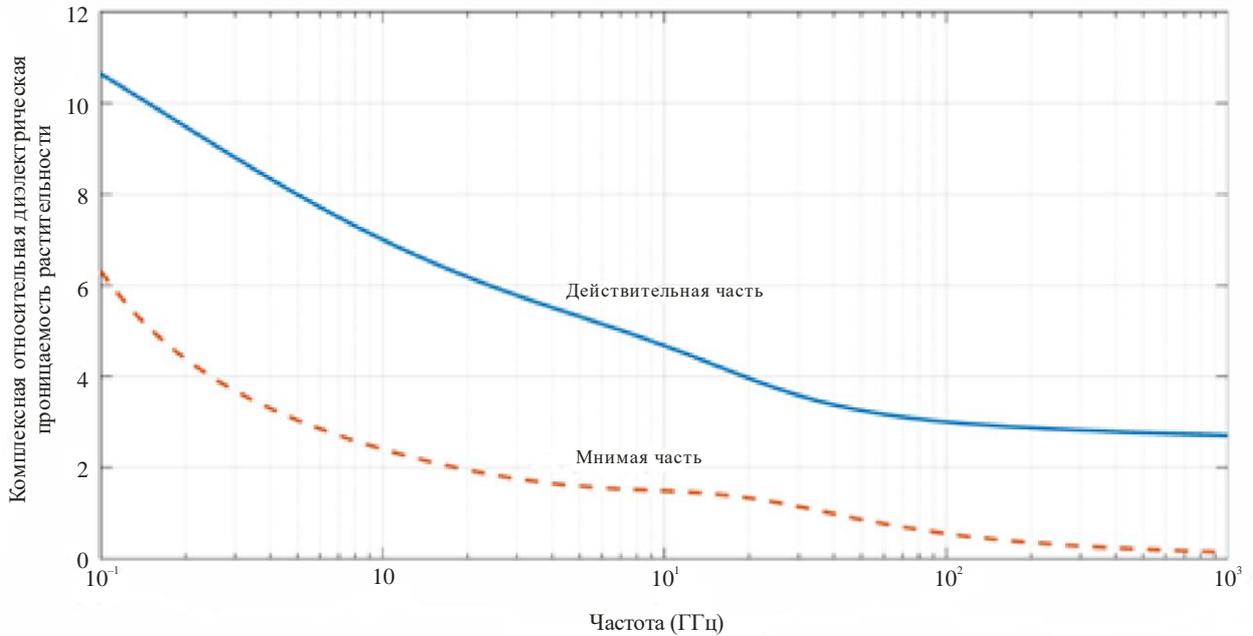
Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость растительности в зависимости от частоты  
( $M_g = 0,68$ ,  $T = 22^\circ\text{C}$ )



P0527-17

РИСУНОК 18

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость растительности в зависимости от частоты  
( $M_g = 0,26$ ,  $T = 22$  °C)



P0527-18

### 5.3.2 Температуры ниже точки заморзания

Для температур ниже точки заморзания ( $-20$  °C  $\leq T < 0$  °C) действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости равны:

$$\epsilon'_v = \epsilon_{dv} + v_{fw} \left[ 4,9 + \frac{82,2}{1 + (f_{\text{GHz}}/9)^2} \right] + v_{bw} [8,092 + 14,2067 X1] + 3,15 v_{ice}; \quad (78)$$

$$\epsilon''_v = v_{fw} \left[ \frac{82,2(f_{\text{GHz}}/9)}{1 + (f_{\text{GHz}}/9)^2} + \frac{11,394}{f_{\text{GHz}}} \right] + 14,2067 v_{bw} Y1, \quad (79)$$

где:

$$\epsilon_{dv} = 6,76 - 10,24 M_g + 6,19 M_g^2; \quad (80)$$

$$v_{fw} = (-0,106 + 0,6591 M_g - 0,610 M_g^2) \exp \left( (0,06 + 0,6883 M_g + 0,0001 M_g^2) \Delta \right); \quad (81)$$

$$v_{bw} = (-0,16 + 1,1876 M_g - 0,387 M_g^2) \exp \left( (0,721 - 1,2733 M_g + 0,8139 M_g^2) \Delta \right); \quad (82)$$

$$v_{ice} = A_{ice} \Delta^2 + B_{ice} \Delta + C_{ice}; \quad (83)$$

$$A_{ice} = 0,001 - 0,012 M_g + 0,0082 M_g^2; \quad (84)$$

$$B_{ice} = 0,036 - 0,2389 M_g + 0,1435 M_g^2; \quad (85)$$

$$C_{ice} = -0,0538 + 0,4616 M_g - 0,3398 M_g^2; \quad (86)$$

$$X1 = \frac{1 + (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,2054} \cos(0,2054\pi/2)}{1 + 2 (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,2054} \cos(0,2054\pi/2) + (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,4108}}; \quad (87)$$

$$Y1 = \frac{(f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,2054} \sin(0,2054\pi/2)}{1 + 2 (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,2054} \cos(0,2054\pi/2) + (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,4108}}; \quad (88)$$

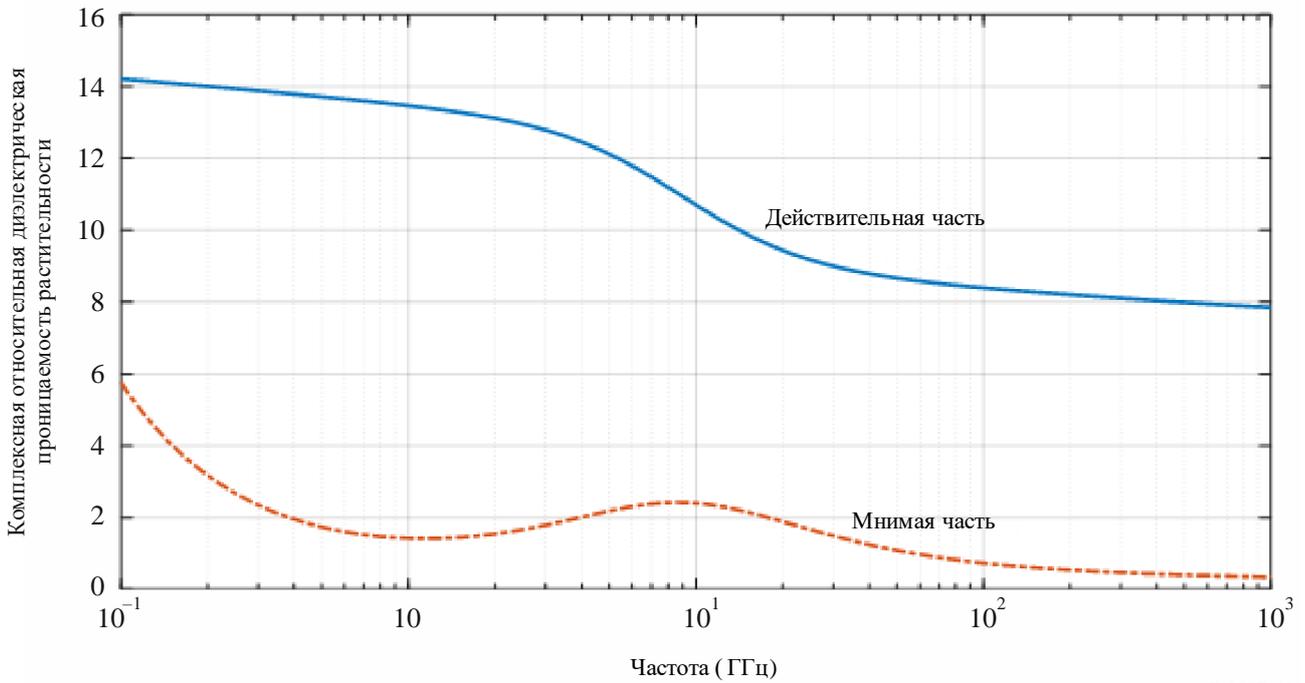
$$\Delta = T - T_f \quad (89)$$

и температура заморзания растительности  $T_f = -6,5$  °C.

Действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости в зависимости от частоты и температуры показаны на рисунках 19 и 20. Эти рисунки демонстрируют, что уменьшение температуры до значений ниже нуля приводит к уменьшению как действительной, так и мнимой частей комплексной относительной диэлектрической проницаемости растительности и ослабляет зависимость этих параметров от частоты. Для частот выше 20 ГГц комплексная относительная диэлектрическая проницаемость растительности становится менее зависимой от температуры.

РИСУНОК 19

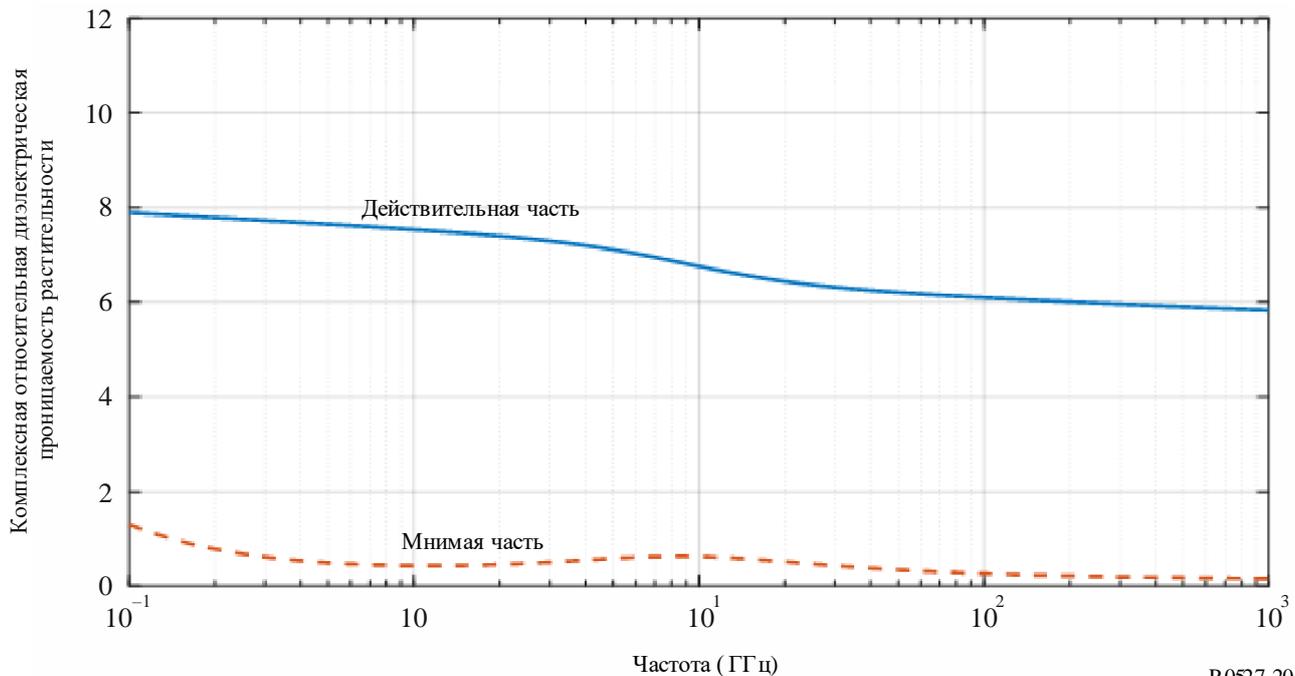
Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость растительности в зависимости от частоты  
( $M_g = 0,68$ ,  $T = -7^\circ\text{C}$ )



P.0527-19

РИСУНОК 20

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость растительности в зависимости от частоты  
( $M_g = 0,68$ ,  $T = -10^\circ\text{C}$ )



P.0527-20

## 6 Коэффициент излучения

Коэффициент излучения  $\epsilon$  определяется как отношение энергии, излучаемой поверхностью материала, к энергии, излучаемой абсолютно черным телом при тех же температуре, частоте и условиях обзора. Коэффициенты излучения и отражения  $\rho$  на одной и той же частоте связаны между собой по закону сохранения энергии:  $\epsilon + \rho = 1$ . Коэффициент излучения поверхности связан с ее комплексной относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  уравнениями Френеля:

$$\epsilon = 1 - |r_p|^2, \quad p = v, h, c, \quad (90)$$

где:

$$r_v = \frac{\epsilon \cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\epsilon \cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}, \quad (91)$$

$$r_h = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}, \quad (92)$$

$$r_c = \frac{r_v + r_h}{2}. \quad (93)$$

Нижний индекс  $p = h$  относится к горизонтально поляризованной составляющей,  $p = v$  – к вертикально поляризованной составляющей, а  $p = c$  – к круговой поляризации.  $\theta$  – угол падения волны относительно нормали к поверхности (то есть для падения по нормали  $\theta = 0^\circ$ ). В особом случае падения по нормали:

$$r_v = \frac{\epsilon - \sqrt{\epsilon}}{\epsilon + \sqrt{\epsilon}}, \quad (94)$$

$$r_h = \frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}}, \quad (95)$$

и тогда:

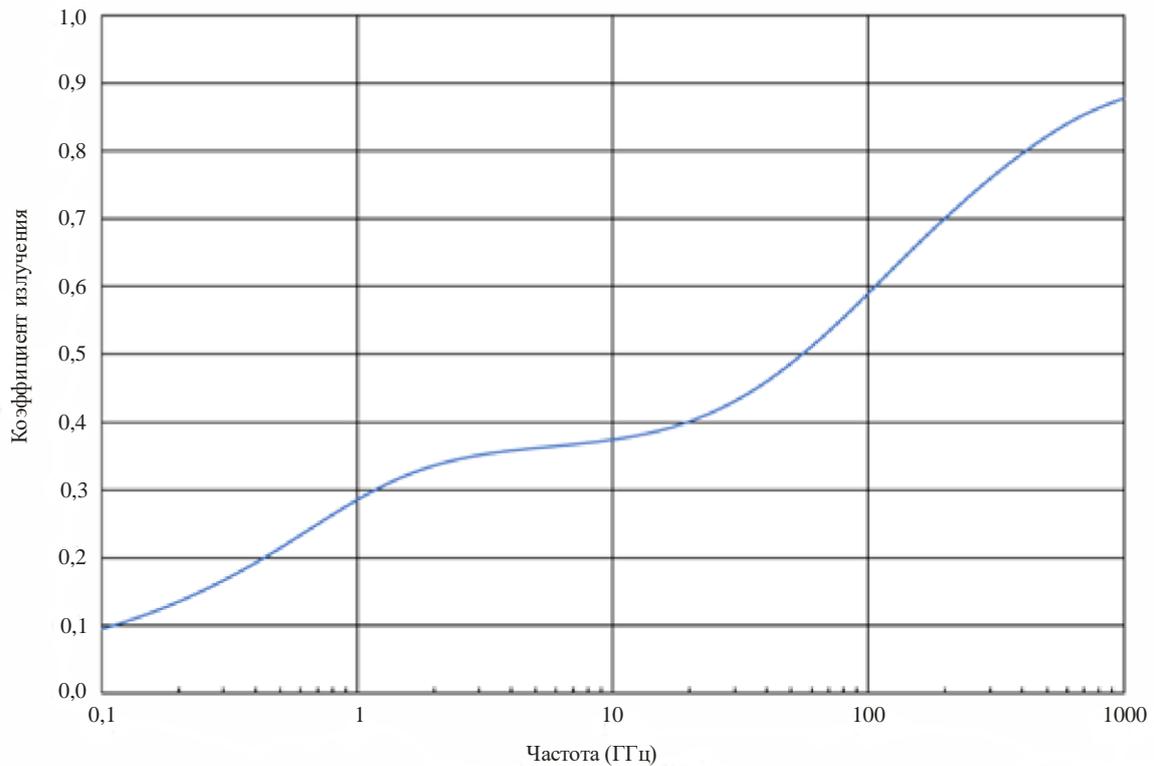
$$r_v = \frac{\epsilon - \sqrt{\epsilon}}{\epsilon + \sqrt{\epsilon}} = -\frac{\sqrt{\epsilon}}{\epsilon} \frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}} = -\frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}} = -r_h. \quad (96)$$

В этих обстоятельствах  $r_c = 0$  и  $\epsilon = 1$ .

График частотной зависимости коэффициента излучения морской воды для гладкой и плоской зеркальной поверхности океана, соответствующей условиям на рисунке 2 (то есть  $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$  и  $S = 35\text{ ppt}$ ), и падения по нормали с вертикально и горизонтально поляризованными составляющими показан на рисунке 21; график частотной зависимости коэффициента излучения илисто-глинистой почвы, соответствующей условиям на рисунке 15 (то есть  $P_{sand} = 5,02\%$ ,  $P_{clay} = 47,38\%$ ,  $P_{silt} = 47,60\%$ ,  $m_v = 0,5$ ,  $T = 23\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\rho_s = 2,56$ ,  $\rho_b = 1,4758\text{ г/см}^3$ ), показан на рисунке 22; а график частотной зависимости коэффициента излучения растительности, соответствующей условиям на рисунке 18 (то есть  $T = 22\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $M_g = 0,26$ ), показан на рисунке 23.

РИСУНОК 21

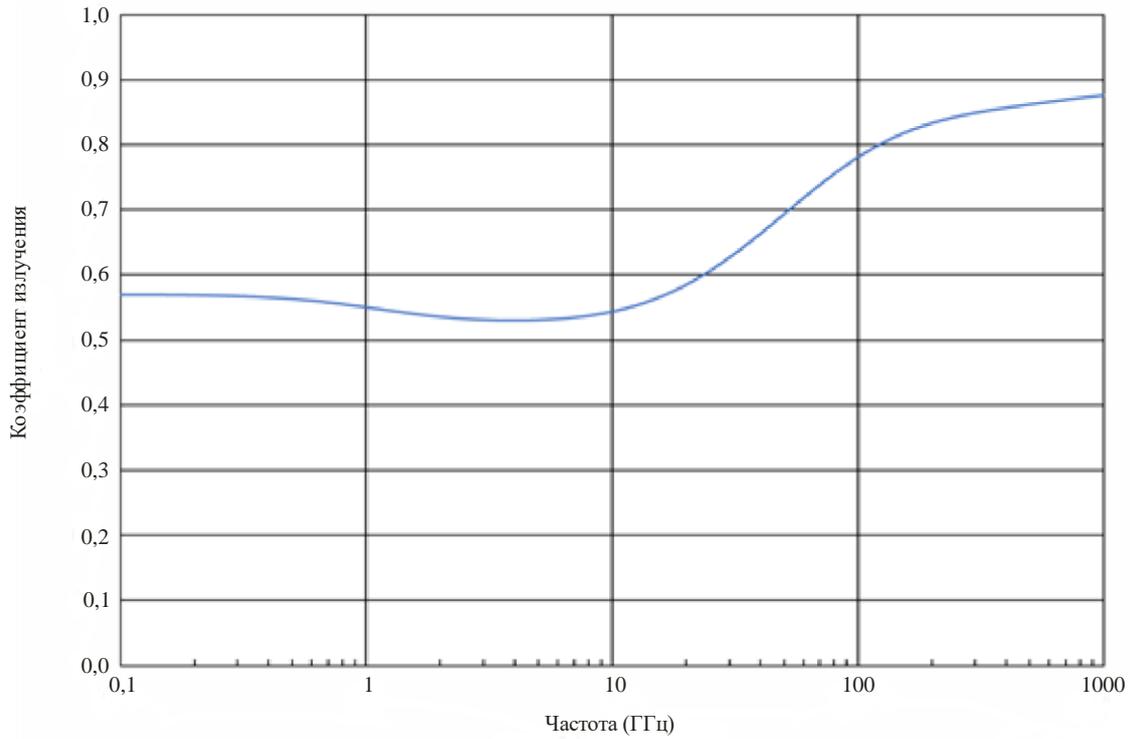
Коэффициент излучения морской воды для идеально гладкой поверхности океана  
( $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$  и  $S = 35\text{ ppt}$ )



P0527-21

РИСУНОК 22

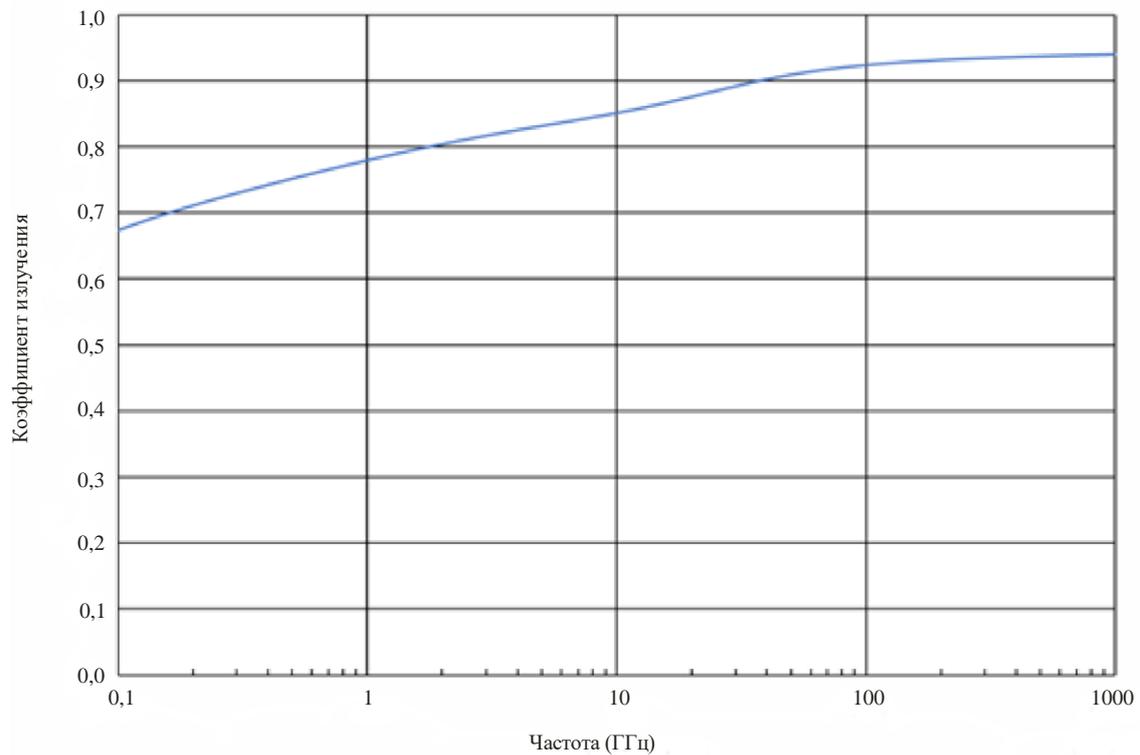
**Коэффициент излучения илесто-глинистой почвы**  
( $m_v = 0,5$ ,  $T = 23$  °C,  $\rho_s = 2,56$ ,  $\rho_b = 1,4758$  г/см<sup>3</sup>)



P0527-22

РИСУНОК 23

**Коэффициент излучения растительности**  
( $M_g = 0,26$ ,  $T = 22$  °C)



P0527-23

## 7 Коэффициент изотропного излучения океана

Коэффициент изотропного излучения океана  $\epsilon_{ocean}$  является функцией поляризации, частоты, угла падения, скорости ветра, температуры и солености воды. Он хорошо аппроксимируется формулой:

$$\epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta, W, T, S) = \epsilon_{ocean,0}(p, f_{GHz}, \theta, T, S) + \Delta\epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta, W, T, S),$$

где  $\epsilon_{ocean,0}(p, f_{GHz}, \theta, T, S)$  – коэффициент излучения  $\epsilon$  (см. пункт 6), зависящий от комплексной относительной диэлектрической проницаемости морской воды  $\epsilon_{sw}$  (см. пункт 5.1.2), а  $\Delta\epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta, W, T, S)$  – добавочный коэффициент изотропного излучения как функция скорости ветра. Его параметры:

$p$ : поляризация ( $v$  – вертикальная;  $h$  – горизонтальная);

$f_{GHz}$ : частота (ГГц);

$\theta$ : угол падения;

$W$ : скорость ветра (м/с);

$T$ : температура воды на поверхности океана (°C);

$S$ : соленость морской воды (ppt)

и

$$\Delta\epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta, W, T, S) = \hat{\Delta}\epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta_{ref}, W, T, S) \left(\frac{\theta}{\theta_{ref}}\right)^{x_p} + \frac{1}{2} \left[ \hat{\Delta}\epsilon_{ocean}(v, f_{GHz}, \theta_{ref}, W, T, S) + \hat{\Delta}\epsilon_{ocean}(h, f_{GHz}, \theta_{ref}, W, T, S) \right] \times \left[ 1 - \left(\frac{\theta}{\theta_{ref}}\right)^{x_p} \right], \quad (97)$$

где  $x_v = 4,0$ ,  $x_h = 1,5$ ,

$$\hat{\Delta}\epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta_{ref}, W, T, S) = \delta_{ref}(p, f_{GHz}, W) \frac{\epsilon_{ocean,0}(p, f_{GHz}, \theta_{ref}, T, S)}{\epsilon_{ocean,0}(p, f_{GHz}, \theta_{ref}, T_{ref}, S)}, \quad (98)$$

где  $\theta_{ref} = 55,2^\circ$ ,  $T_{ref} = 20^\circ\text{C}$ ;

$$\delta_{ref}(p, f_{GHz}, W) = \sum_{k=1}^5 \delta_k(p, f_{GHz}) W^k, \quad (99)$$

а коэффициенты  $\delta_k(p, f_{GHz})$  приведены в таблице 3.

Эта модель действительна в полосе частот от 6,8 до 85,5 ГГц и для углов падения волны на поверхность Земли от 0 до 65 градусов (то есть углов места от 25 до 90 градусов). Значения коэффициента излучения при скорости ветра выше 20 м/с (72 км/ч) следует линейно экстраполировать по его значениям при скорости ветра 20 м/с. Значения коэффициента излучения на частотах между теми частотами, которые указаны в таблице 3, можно вычислить путем линейной интерполяции между этими табличными частотами.

ТАБЛИЦА 3

Коэффициенты  $\delta_k(p, f_{GHz})$

$f_{GHz}$ (ГГц)	$p$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$
6,8	$v$	4,96726E-05	-3,03363E-04	5,60506E-05	-2,86408E-06	4,88803E-08
6,8	$h$	3,85750E-03	-5,10844E-04	4,89469E-05	-1,50552E-06	1,20306E-08
10,7	$v$	-2,35464E-04	-2,76866E-04	5,73583E-05	-2,94364E-06	4,89421E-08
10,7	$h$	4,17650E-03	-6,20751E-04	6,82607E-05	-2,47982E-06	2,80155E-08
18,7	$v$	3,26502E-05	-3,65935E-04	6,62807E-05	-3,40705E-06	5,81231E-08
18,7	$h$	5,06330E-03	-7,41324E-04	8,54446E-05	-3,28225E-06	4,01950E-08
37,0	$v$	-7,03594E-04	-2,17673E-04	4,00659E-05	-1,84769E-06	2,76830E-08
37,0	$h$	5,63832E-03	-8,43744E-04	1,06734E-04	-4,61253E-06	6,67315E-08
85,5	$v$	-3,14175E-03	4,06967E-04	-3,33273E-05	1,26520E-06	-1,67503E-08
85,5	$h$	6,01311E-03	-7,00158E-04	1,26075E-04	-7,27339E-06	1,35737E-07

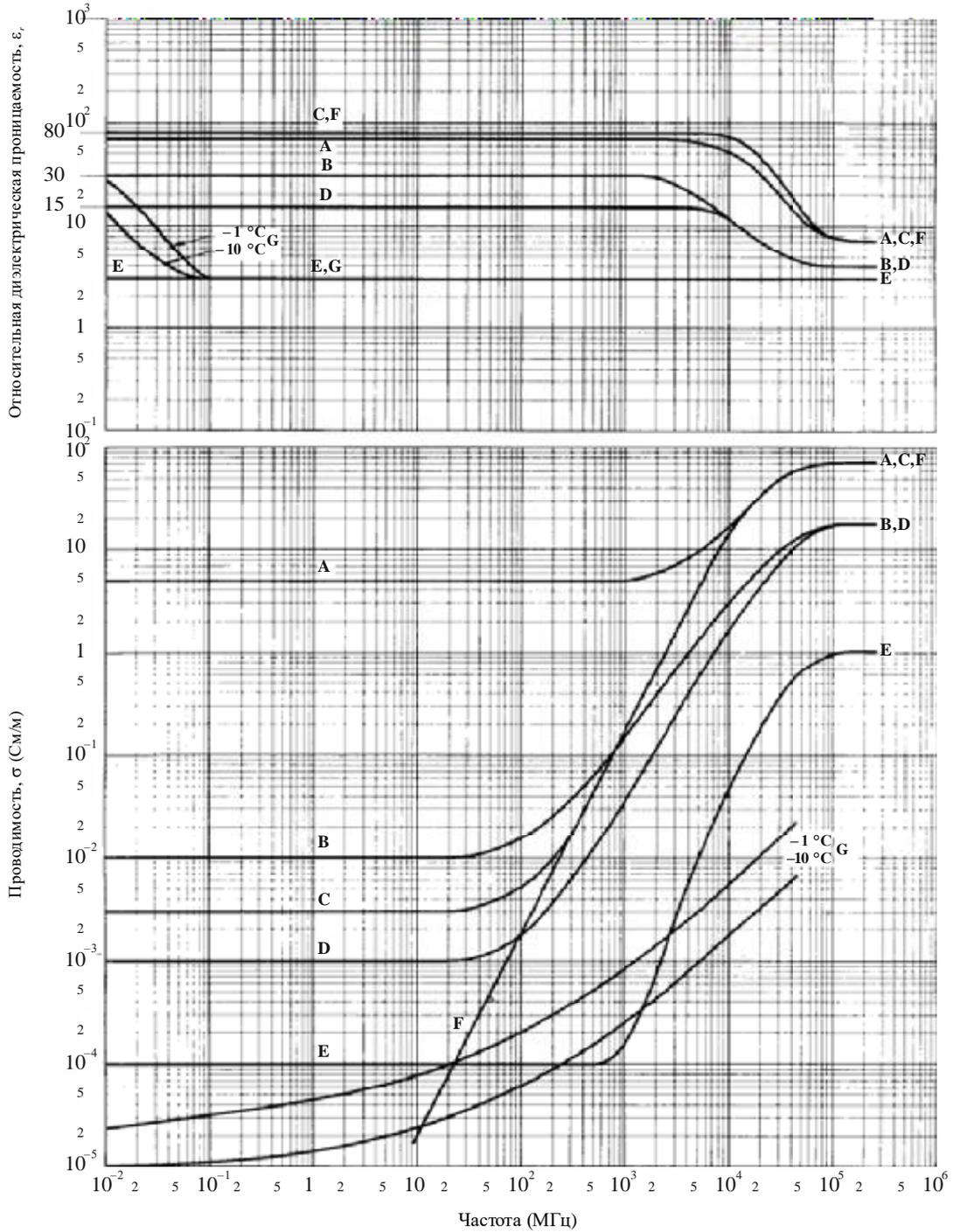
**Прилагаемый документ  
к Приложению 1**

**Электрические свойства, выраженные в величинах  
диэлектрической проницаемости и проводимости,  
используемые в Рекомендациях МСЭ-R P.368 и МСЭ-R P.832**

**1 Введение**

Нижеследующий рисунок 24 повторяет рисунок 1 из Рекомендации МСЭ-R P.527-3, иллюстрирующий типичные значения проводимости и диэлектрической проницаемости для разных типов грунта в зависимости от частоты. Эти графики перенесены из более ранних версий настоящей Рекомендации для удобства пользователей Рекомендаций МСЭ-R P.368 и МСЭ-R P.832.

РИСУНОК 24

Относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  и проводимость  $\sigma$  в зависимости от частоты

- A – морская вода (средней солености), 20°C
- B – влажный грунт
- C – пресная вода, 20°C
- D – почва средней сухости
- E – очень сухой грунт
- F – чистая вода, 20°C
- G – лед (из пресной воды)