

Международный союз электросвязи

МСЭ-R
Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.527-4
(06/2017)

**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 Приложении 1 к 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
P	Распространение радиоволн
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, 2018 г.

© ITU 2018

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.527-4

Электрические характеристики земной поверхности

(1978-1982-1992-2017)

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 Дополнении 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 μ , диэлектрической проницаемостью ϵ и электропроводностью σ ;
- b) что магнитную проницаемость поверхности Земли μ 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 данном 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 μ ;
- диэлектрическая проницаемость ϵ ; и
- электропроводность¹ σ .

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 ω , времени t , магнитной проницаемости μ , диэлектрической проницаемости ϵ и электропроводности σ . Тогда вектор волнового числа \vec{k} имеет величину k :

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

Значения диэлектрической проницаемости, магнитной проницаемости и электропроводности вакуума:

- диэлектрическая проницаемость вакуума: $\epsilon_0 = 8,854\,187\,817 \times 10^{-12}$ (Ф/м);
- магнитная проницаемость вакуума: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (Н/А²);
- электропроводность вакуума: $\sigma_0 = 0,0$ (См/м).

Удобно определить относительную диэлектрическую проницаемость ϵ_r и относительную магнитную проницаемость μ_r по отношению к значениям этих параметров для вакуума следующим образом:

- относительная диэлектрическая проницаемость: $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$;
- относительная магнитная проницаемость: $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$,

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

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

Как показано в уравнении (1а), волновое число зависит как от σ , так и от ε , 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 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 ε , относительной диэлектрической проницаемости ε_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 ε может быть комплексным числом.

В уравнении (1b) ε_r' – это действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости, а ε_r'' – ее мнимая часть. Действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости ε_r' связана с накопленной энергией, когда вещество подвергается воздействию электромагнитного поля. Мнимая часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости ε_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 (колебание диполей), и мнимую часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости ε_r'' можно разложить на два члена:

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

где ε_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, ε_d'' и, следовательно, ε_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 σ 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 ∞ , так что ее можно исключить из уравнения (3).

В этом случае вместо мнимой части комплексной относительной диэлектрической проницаемости легче работать с проводимостью σ , которую можно получить из уравнения (2), приравняв ϵ_d'' к 0:

$$\sigma = 2\pi\epsilon_0 f \epsilon_r'' = 0,05563 f_{\text{GHz}} \epsilon_r'' \quad (3a)$$

где f_{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 ϵ_r' и ϵ_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 δ , 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 δ в однородной среде с комплексной относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r ($\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$) составляет:

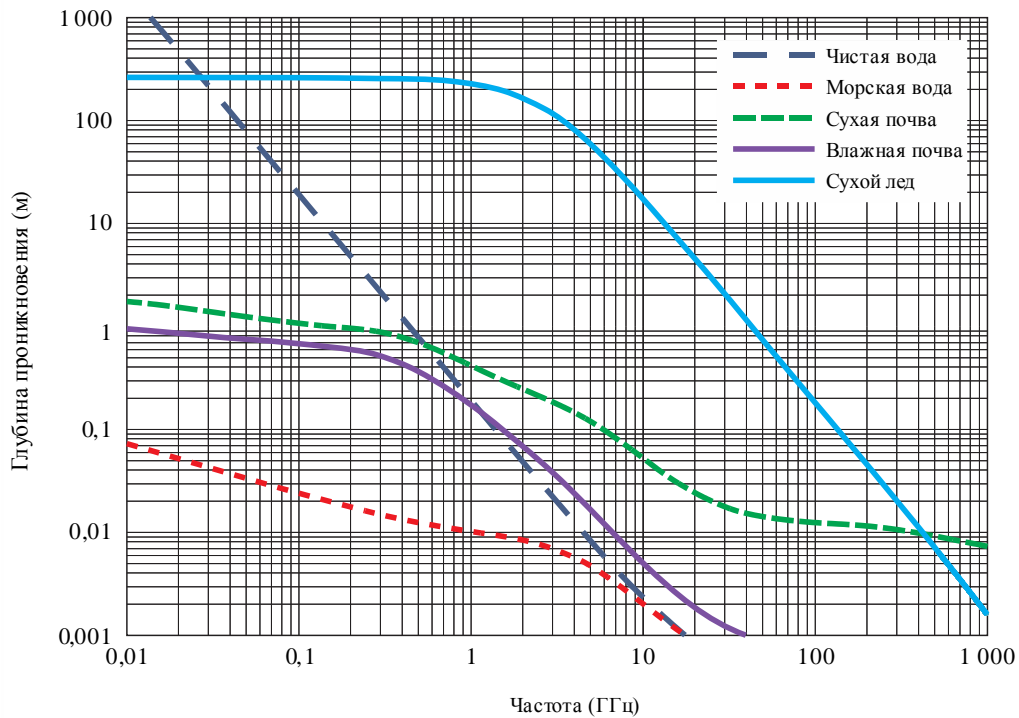
$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{(\epsilon_r')^2 + (\epsilon_r'')^2} - \epsilon_r'}} \quad (\text{м}), \quad (4)$$

где λ – 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 варьируются 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 варьироваться 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

Модели, описанные в следующих пунктах, представляют собой методы прогнозирования комплексной относительной диэлектрической проницаемости для следующих видов земной поверхности:

- чистая вода;
- морская (то есть соленая) вода;
- лед;
- сухая почва (смесь песка, глины и ила);
- влажная почва (сухая почва с водой);
- растительность (выше и ниже точки замерзания).

В этом пункте индексы при обозначении комплексной относительной диэлектрической проницаемости и, следовательно, индексы ее действительной и мнимой частей выбраны так, чтобы указывать на относительную диэлектрическую проницаемость для конкретных случаев; например, индекс "pw" для чистой воды, индекс "sw" для морской воды и т. д.

5.1 Вода

В этом пункте представлены методы прогнозирования комплексной относительной диэлектрической проницаемости чистой воды, морской воды и льда.

5.1.1 Чистая вода

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость чистой воды ϵ_{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:

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

$$\epsilon_1 = 0,0671\epsilon_s; \quad (9)$$

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

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

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 ϵ_{sw} зависит от частоты f_{GHz} (ГГц), температуры T (°C) и солености S (г/кг или ppt)².

$$\epsilon_{sw} = \epsilon'_{sw} - j \epsilon''_{sw}; \quad (14)$$

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

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

где:

$$\epsilon_{ss} = \epsilon_s \exp(-3,56417 \times 10^{-3}S + 4,74868 \times 10^{-6}S^2 + 1,15574 \times 10^{-5}TS); \quad (17)$$

$$f_{1s} = f_1 \left(1 + S(2,39357 \times 10^{-3} - 3,13530 \times 10^{-5}T + 2,52477 \times 10^{-7}T^2) \right) \quad (\text{ГГц}); \quad (18)$$

$$\epsilon_{1s} = \epsilon_1 \exp(-6,28908 \times 10^{-3}S + 1,76032 \times 10^{-4}S^2 - 9,22144 \times 10^{-5}TS); \quad (19)$$

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

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

Значения ϵ_s , ϵ_1 , ϵ_{∞} , f_1 и f_2 получены из уравнений (8), (9), (10), (12) и (13). Кроме того, σ_{sw} определяется как:

$$\sigma_{sw} = \sigma_{35} R_{15} R_{T15} \quad (\text{См/м}); \quad (22)$$

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

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

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

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

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

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.

² Термин "ppt" означает "частей на тысячу".

РИСУНОК 2

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

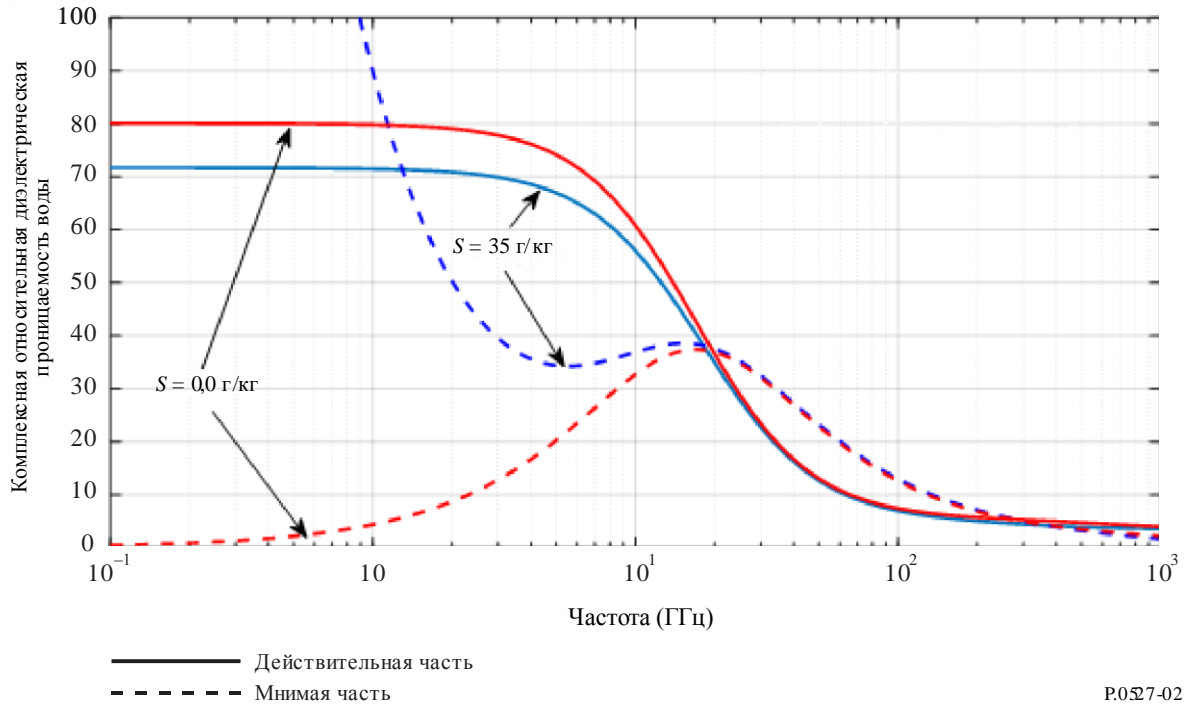
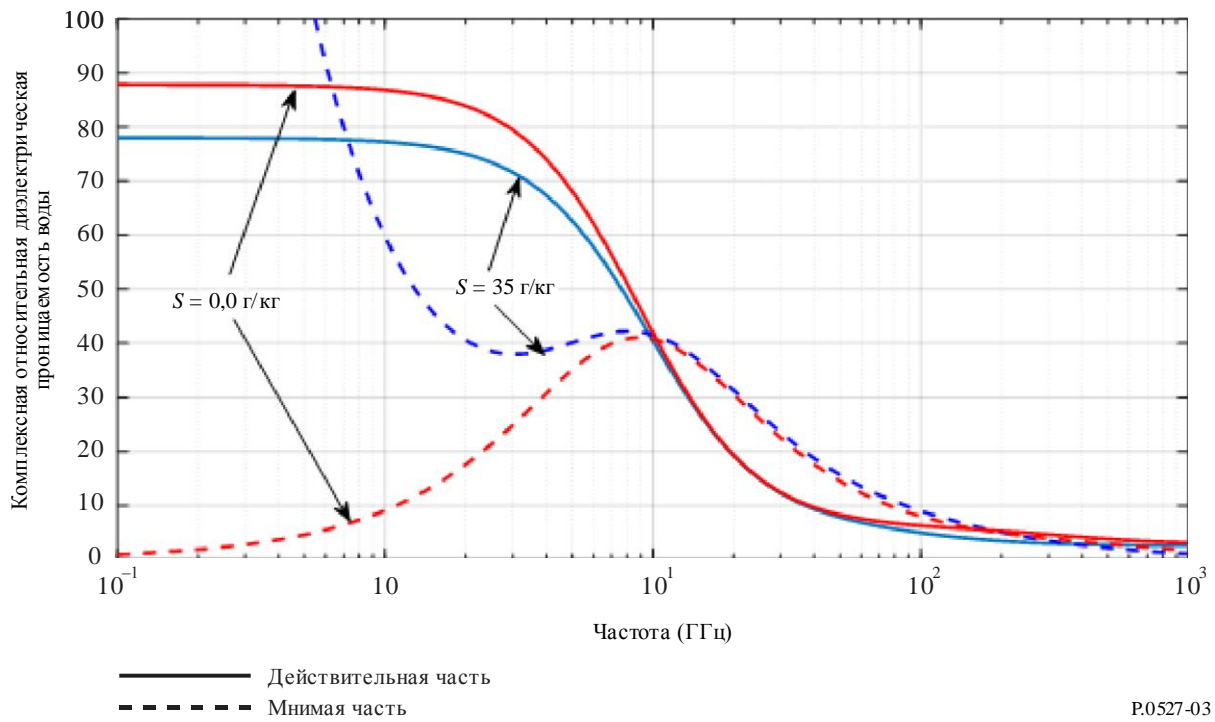


РИСУНОК 3

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



5.1.3 Лед

В данном пункте представлены методы прогнозирования комплексной относительной диэлектрической проницаемости сухого льда и влажного льда.

5.1.3.1 Сухой лед

Сухой лед состоит из замерзшей чистой воды (то есть $T \leq 0$ °C). Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость сухого льда ϵ_{ice} составляет:

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

Действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости ϵ'_{ice} зависит от температуры T (°C) и не зависит от частоты:

$$\epsilon'_{ice} = 3,1884 + 0,00091 T, \quad (29)$$

а мнимая часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости ϵ''_{ice} зависит от температуры T (°C) и частоты f_{GHz} (ГГц):

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

где:

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

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

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

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

Действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости сухого льда показаны на рисунке 4 для $T = -10$ °C.

5.1.3.2 Влажный лед

Когда лед находится во влажном состоянии (при 0 °C), его зерна окружены жидкой водой. Рассматривая зерна льда как сферические включения в жидкой воде, можно применить формулу смешения диэлектриков Максвелла-Гарнетта, чтобы выразить комплексную относительную диэлектрическую проницаемость влажного льда $\epsilon_{wet\ ice}$ как сочетание комплексной относительной диэлектрической проницаемости сухого льда ϵ_{ice} и комплексной относительной диэлектрической проницаемостью чистой воды ϵ_{pw} :

$$\epsilon_{wet\ ice} = \left(\frac{(\epsilon_{ice} + 2\epsilon_{pw}) + 2(\epsilon_{ice} - \epsilon_{pw})(1 - F_{wc})}{(\epsilon_{ice} + 2\epsilon_{pw}) - (\epsilon_{ice} - \epsilon_{pw})(1 - F_{wc})} \right) \epsilon_{pw}, \quad (35)$$

F_{wc} – это объемная доля жидкой воды ($\text{м}^3/\text{м}^3$). Уравнение (35) является комплексным, и его можно разбить на действительную и мнимую части. Каждая часть является функцией действительной и мнимой частей комплексной относительной диэлектрической проницаемости сухого льда и соответствующих частей воды. Действительная и мнимая части влажного льда при $f_{\text{GHz}} = 60$ ГГц и $T = 0$ °C в зависимости от содержания жидкой воды изображены на рисунке 5.

РИСУНОК 4

Зависимость комплексной относительной диэлектрической проницаемости сухого льда от частоты ($T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$)

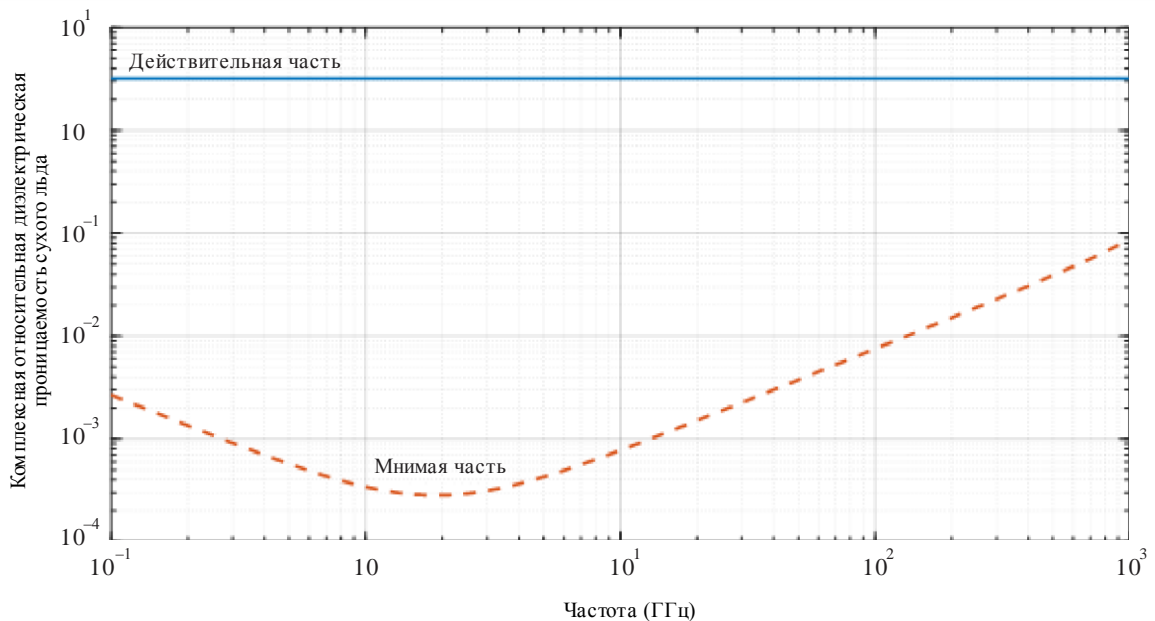
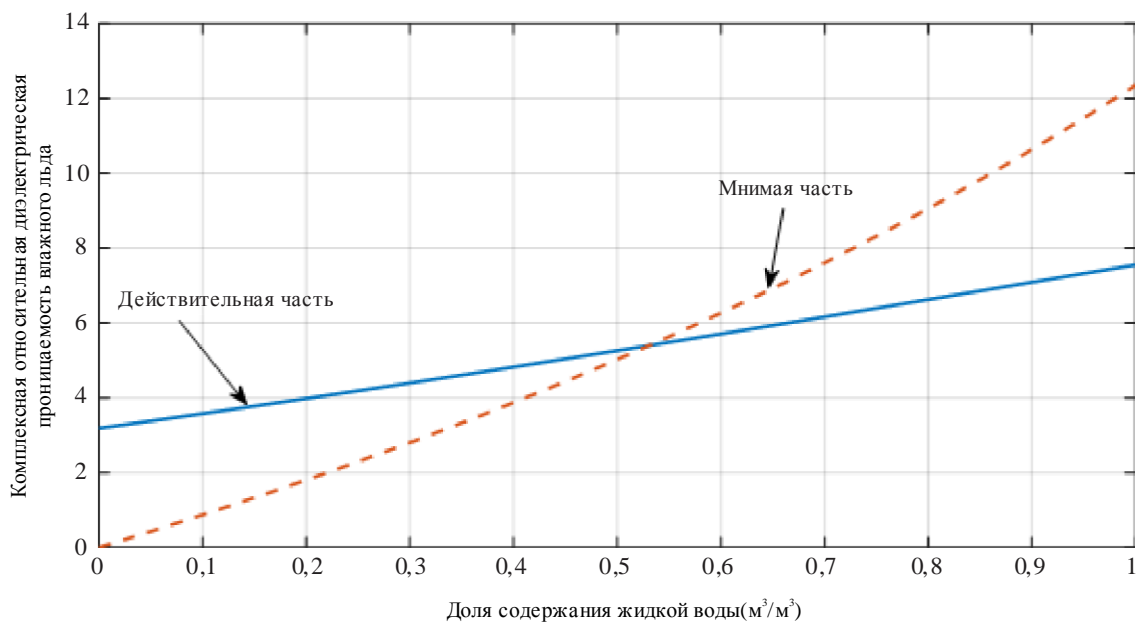


РИСУНОК 5

Зависимость комплексной относительной диэлектрической проницаемости влажного льда от содержания жидкой воды ($f = 60\text{ ГГц}$ и $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)



5.2 Почва

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость почвы ϵ_{soil} зависит от частоты f_{GHz} (ГГц), температуры T ($^{\circ}\text{C}$), 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, а также д) удельным весом (то есть массовой плотностью почвы, деленной

на массовую плотность воды) сухой смеси составляющих почвы ρ_s , и е) объемным содержанием влаги m_v , равным объему воды, деленному на общий объем почвы для данного образца почвы.

В качестве входного параметра также требуется значение объемной плотности почвы ρ_b (то есть масса почвы в данном объеме (г/см^3)). Его трудно измерить напрямую, но можно получить из процентного содержания сухих компонентов. Если локальная функция псевдопреобразования недоступна, можно использовать следующую эмпирическую функцию псевдопреобразования:

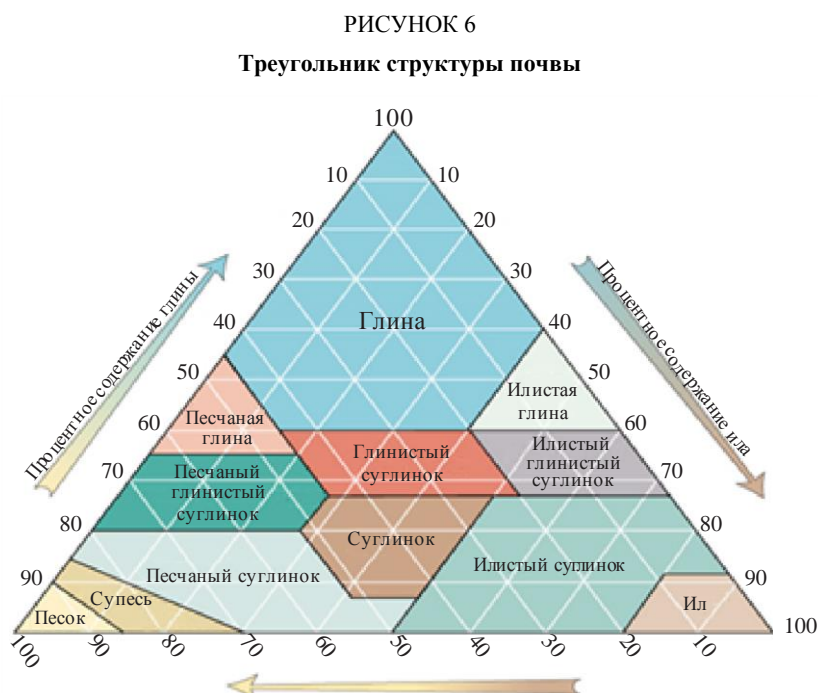
$$\rho_b = 1,07256 + 0,078886 \ln(P_{sand}) + 0,038753 \ln(P_{clay}) + 0,032732 \ln(P_{silt}). \quad (36)$$

Уравнение (36) ненадежно при содержании любого компонента менее 1%. Если процентное содержание составляющей меньше 1%, то соответствующий член в уравнении (36) следует опустить. Сумма процентного содержания составляющих должна быть равна 100%.

Типичные значения процентного содержания составляющих, удельного веса и объемной плотности для четырех типичных типов почвы приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1
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
ρ_s	2,66	2,70	2,59	2,56
ρ_b (г/см^3)	1,6006	1,5781	1,5750	1,4758



P.0527-06

Структурный класс почвы, указанный в первой строке таблицы 1, основан на треугольнике структуры почвы, изображенном на рисунке 6.

При данном методе прогнозирования почва рассматривается как смесь четырех компонентов: а) частиц почвы, состоящих из глины, песка и ила; б) воздуха; с) 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 d) свободной воды (или текучей воды, которая свободно течет в пустотах почвы). Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость почвы ε_{soil} этой четырехкомпонентной смеси:

$$\varepsilon_{soil} = \varepsilon'_{soil} - j\varepsilon''_{soil}, \quad (37)$$

где:

$$\varepsilon'_{soil} = \left[1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\{\varepsilon'_{sm}\}^\alpha - 1) + m_v^{\beta'} (\varepsilon'_{fw})^\alpha - m_v \right]^{1/\alpha}; \quad (38)$$

$$\varepsilon''_{soil} = \left[m_v^{\beta''} (\varepsilon''_{fw})^\alpha \right]^{1/\alpha}; \quad (39)$$

$$\varepsilon'_{sm} = (1,01 + 0,44 \rho_s)^2 - 0,062; \quad (40)$$

$$\beta' = 1,2748 - 0,00519 P_{sand} - 0,00152 P_{clay}; \quad (41)$$

$$\beta'' = 1,33797 - 0,00603 P_{sand} - 0,00166 P_{clay} \quad (42)$$

и

$$\alpha = 0,65. \quad (43)$$

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

$$\varepsilon'_{fw} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_1}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty}{1 + (f_{GHz}/f_2)^2} + \varepsilon_\infty + \frac{18 \sigma'_{eff} (\rho_s - \rho_b)}{f_{GHz} \rho_s m_v}; \quad (44)$$

$$\varepsilon''_{fw} = \frac{(f_{GHz}/f_1)(\varepsilon_s - \varepsilon_1)}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{(f_{GHz}/f_2)(\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty)}{1 + (f_{GHz}/f_2)^2} + \frac{18 \sigma''_{eff} (\rho_s - \rho_b)}{f_{GHz} \rho_s m_v}; \quad (45)$$

где ε_s , ε_1 , ε_∞ , f_1 и f_2 получены из уравнений (8), (9), (10), (12) и (13), а σ'_{eff} и σ''_{eff} составляют:

$$\sigma'_{eff} = (f_{GHz}/1,35) \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{1 + (f_{GHz}/1,35)^2} \right); \quad (46)$$

$$\sigma''_{eff} = \sigma_2 + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{1 + (f_{GHz}/1,35)^2} \quad (47)$$

и

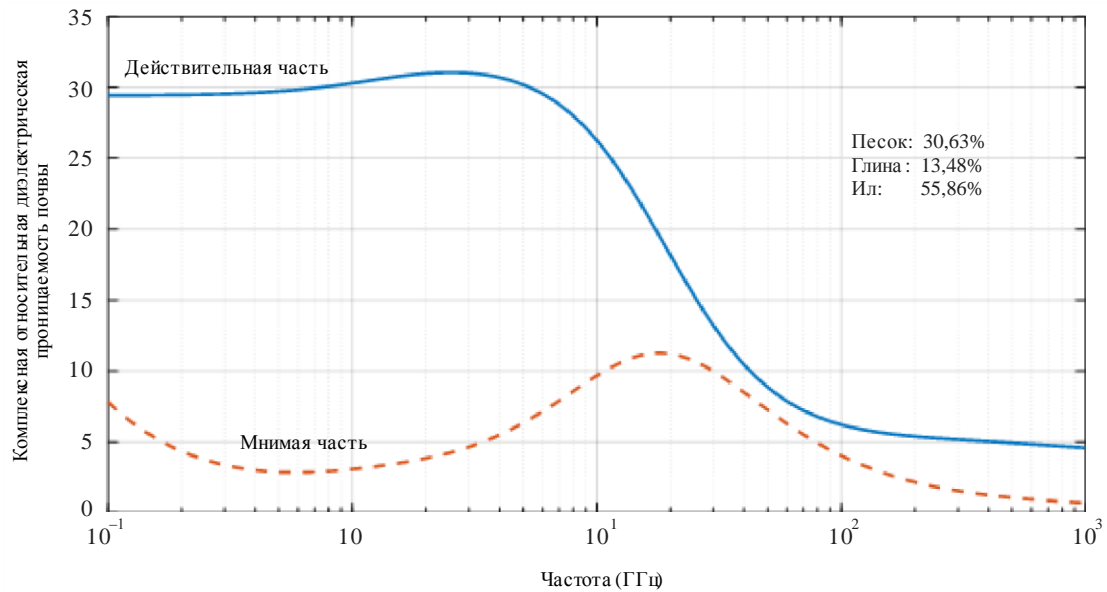
$$\sigma_1 = 0,0467 + 0,2204 \rho_b - 0,004111 P_{sand} - 0,006614 P_{clay}; \quad (48)$$

$$\sigma_2 = -1,645 + 1,939 \rho_b - 0,0225622 P_{sand} + 0,01594 P_{clay}. \quad (49)$$

На рисунках 7, 8 и 9 приведены примеры комплексной относительной диэлектрической проницаемости почвы двух типов. На рисунках 7 и 9 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 7

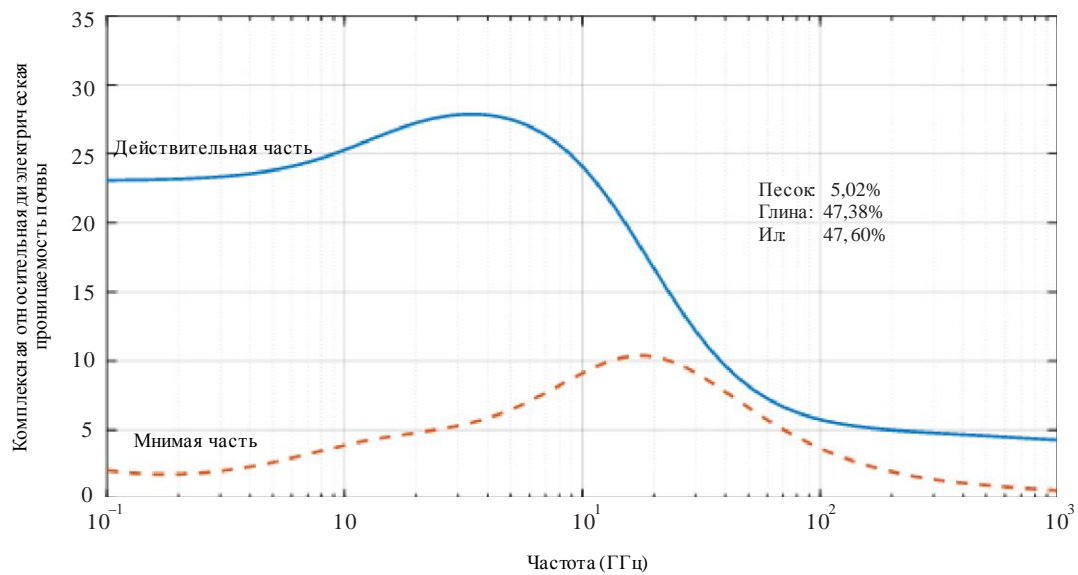
Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость илесто-суглинистой почвы в зависимости от частоты
 ($m_v = 0,5$, $T = 23$ °C, $\rho_s = 2,59$, $\rho_b = 1,5750$ г/см⁻³)



P.0527-07

РИСУНОК 8

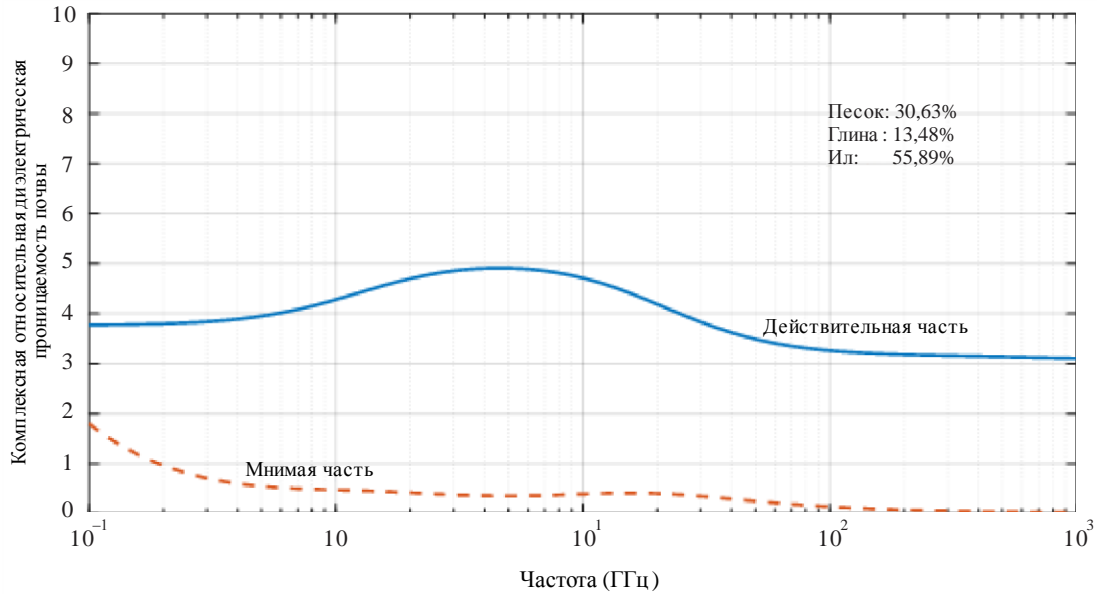
Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость илесто-глинистой почвы в зависимости от частоты
 ($m_v = 0,5$, $T = 23$ °C, $\rho_s = 2,56$, $\rho_b = 1,4758$ г/см⁻³)



P.0527-08

РИСУНОК 9

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость илесто-суглинистой почвы в зависимости от частоты
($m_v = 0,07$, $T = 23$ °C, $\rho_s = 2,59$, $\rho_b = 1,5750$ г/см³)



P.0527-09

5.3 Растительность

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

$$M_g = \frac{M_{mv} - M_{dv}}{M_{mv}}, \quad (50)$$

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:

$$\varepsilon_v = \varepsilon'_v - j \varepsilon''_v \quad (51)$$

Действительная часть ε'_v и мнимая часть ε''_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:

$$\varepsilon'_v = \varepsilon_{dv} + v_{fw} \left[\varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_1)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_1)^2} + \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{\infty})}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_2)^2} \right] + v_{bw} \left[2,9 + \frac{55[1 + \sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,02f_1)}]}{1 + 2\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,02f_1) + (f_{\text{GHz}}/0,01f_1)}} \right]; \quad (52)$$

$$\varepsilon''_v = v_{fw} \left[\frac{(f_{\text{GHz}}/f_1)(\varepsilon_s - \varepsilon_1)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_1)^2} + \frac{(f_{\text{GHz}}/f_2)(\varepsilon_1 - \varepsilon_{\infty})}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_2)^2} + \frac{18 \sigma_{sw}}{f_{\text{GHz}}} \right] + v_{bw} \left[\frac{55\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,02f_1)}}{1 + 2\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,02f_1) + (f_{\text{GHz}}/0,01f_1)}} \right], \quad (53)$$

где ε_{dv} — действительная часть относительной диэлектрической проницаемости объемной растительности, v_{fw} — объемная доля свободной воды и v_{bw} — объемная доля связанной воды, причем:

$$\varepsilon_{dv} = 1,7 - 0,74 M_g + 6,16 M_g^2; \quad (54)$$

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

$$v_{bw} = 4,64 M_g^2 / (1 + 7,36 M_g^2), \quad (56)$$

σ_{sw} – электропроводность соленой воды, приведенная в уравнениях (22)–(27), где соленость S равна:

$$S = -28,7 M_g + 34,83 \quad \left(\frac{\text{г}}{\text{кг}}\right), \quad (57)$$

и значения ε_s , ε_1 , ε_∞ , f_1 и f_2 получены соответственно из уравнений (8), (9), (10), (12) и (13).

При температуре 22 °С в диапазоне частот до 40 ГГц уравнения (52) и (53) изменяются следующим образом:

$$\varepsilon'_v = \varepsilon_{dv} + v_{fw} \left[4,9 + \frac{75}{1 + (f_{\text{GHz}}/18)^2} \right] + v_{bw} \left[2,9 + \frac{55[1 + \sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,36)}]}{1 + 2\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,36)} + (f_{\text{GHz}}/0,18)} \right]; \quad (58)$$

$$\varepsilon''_v = v_{fw} \left[\frac{75(f_{\text{GHz}}/18)}{1 + (f_{\text{GHz}}/18)^2} + \frac{22,86}{f_{\text{GHz}}} \right] + v_{bw} \left[\frac{55\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,36)}}{1 + 2\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0,36)} + (f_{\text{GHz}}/0,18)} \right]. \quad (59)$$

Уравнения (58) и (59) 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 10 и 11 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 10

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость растительности в зависимости от частоты
($M_g = 0,68$, $T = 22$ °С)

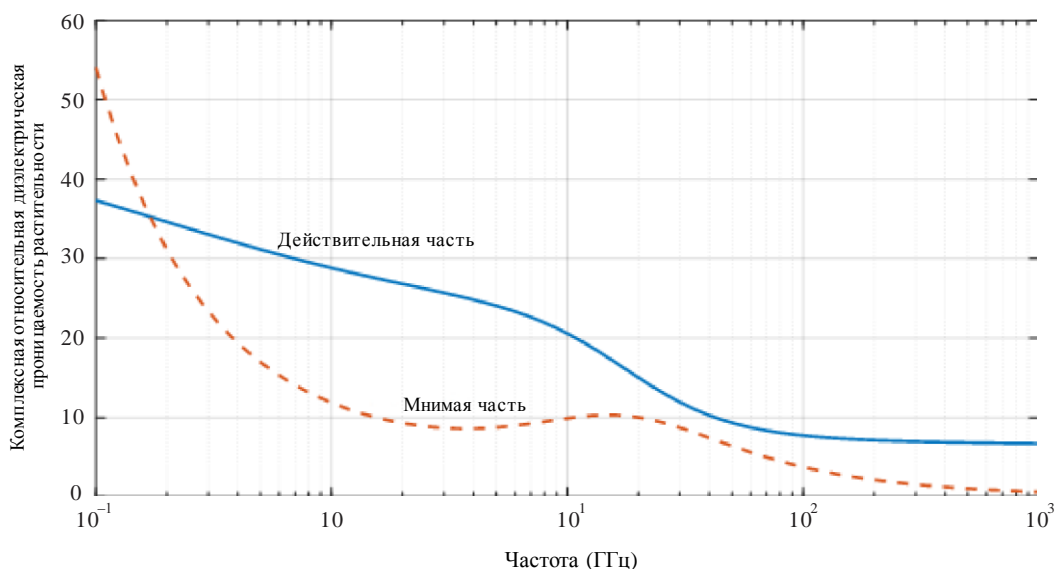
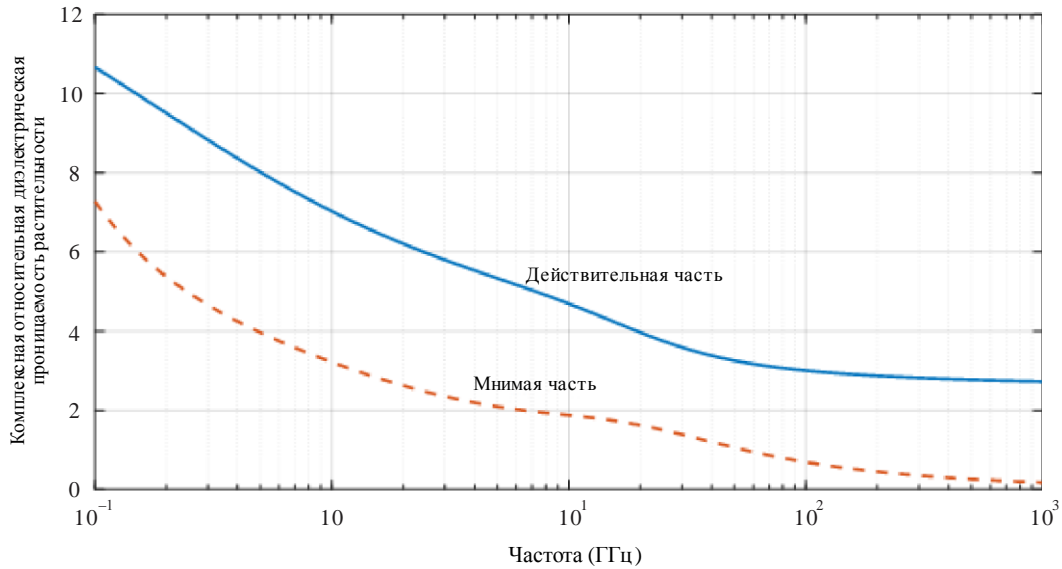


РИСУНОК 11

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



P.0527-11

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:

$$\varepsilon'_v = \varepsilon_{dv} + v_{fw} \left[4,9 + \frac{82,2}{1 + (f_{\text{GHz}}/9)^2} \right] + v_{bw} [8,092 + 14,2067 X1] + 3,15 v_{ice}; \quad (60)$$

$$\varepsilon''_v = v_{fw} \left[\frac{82,2(f_{\text{GHz}}/9)}{1 + (f_{\text{GHz}}/9)^2} + \frac{11,394}{f_{\text{GHz}}} \right] + 14,2067 v_{bw} Y1, \quad (61)$$

где:

$$\varepsilon_{dv} = 6,76 - 10,24 M_g + 6,19 M_g^2; \quad (62)$$

$$v_{fw} = (-0,106 + 0,6591 M_g - 0,610 M_g^2) \exp\left((0,06 + 0,6883 M_g + 0,0001 M_g^2) \Delta\right); \quad (63)$$

$$v_{bw} = (-0,16 + 1,1876 M_g - 0,387 M_g^2) \exp\left((0,721 - 1,2733 M_g + 0,8139 M_g^2) \Delta\right); \quad (64)$$

$$v_{ice} = A_{ice} \Delta^2 + B_{ice} \Delta + C_{ice}; \quad (65)$$

$$A_{ice} = 0,001 - 0,012 M_g + 0,0082 M_g^2; \quad (66)$$

$$B_{ice} = 0,036 - 0,2389 M_g + 0,1435 M_g^2; \quad (67)$$

$$C_{ice} = -0,0538 + 0,4616 M_g - 0,3398 M_g^2; \quad (68)$$

$$X1 = \frac{1 + (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,2054} \cos(0,2054\pi/2)}{1 + 2 (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,2054} \cos(0,2054\pi/2) + (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,4108}}; \quad (69)$$

$$Y1 = \frac{(f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,2054} \sin(0,2054\pi/2)}{1 + 2 (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,2054} \cos(0,2054\pi/2) + (f_{\text{GHz}}/1,2582)^{0,4108}}; \quad (70)$$

$$\Delta = T - T_f \quad (71)$$

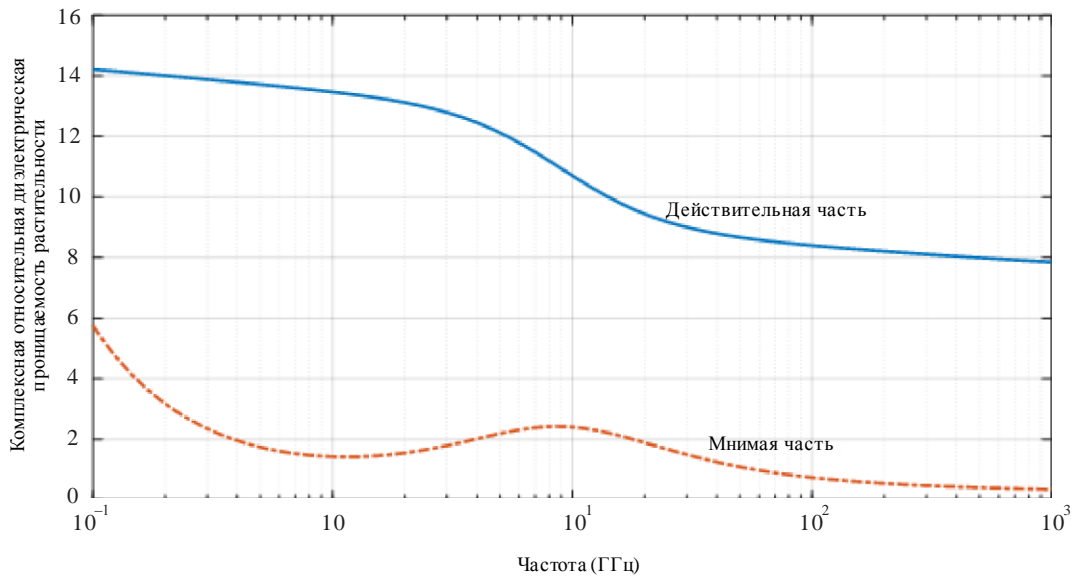
и температура заморзания растительности $T_f = -6,5$ °C.

Действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости в зависимости от частоты и температуры показаны на рисунках 12 и 13. 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 12

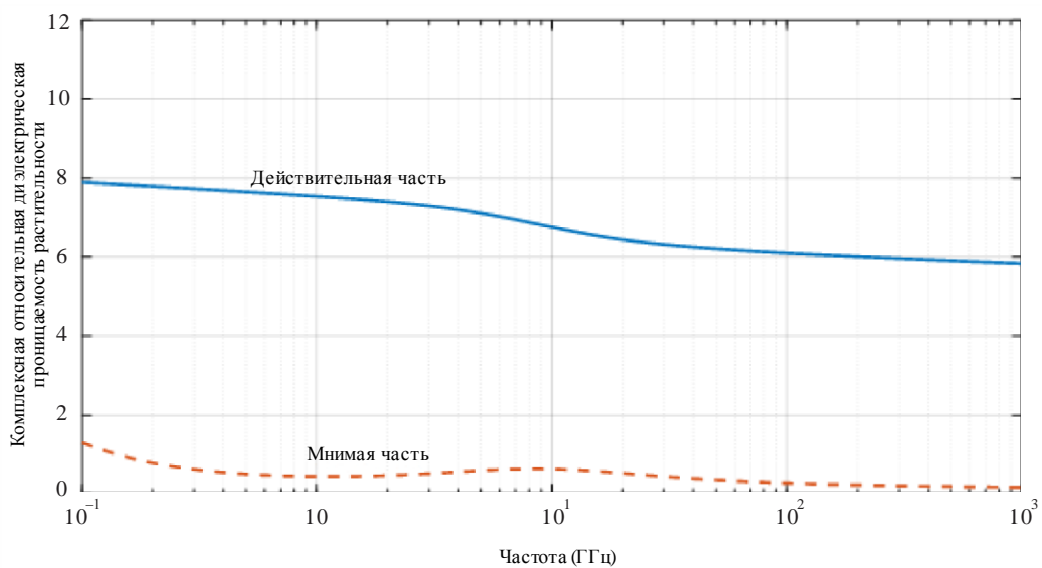
Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость растительности в зависимости от частоты
($M_g = 0,68$, $T = -7\text{ °C}$)



P0527-12

РИСУНОК 13

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

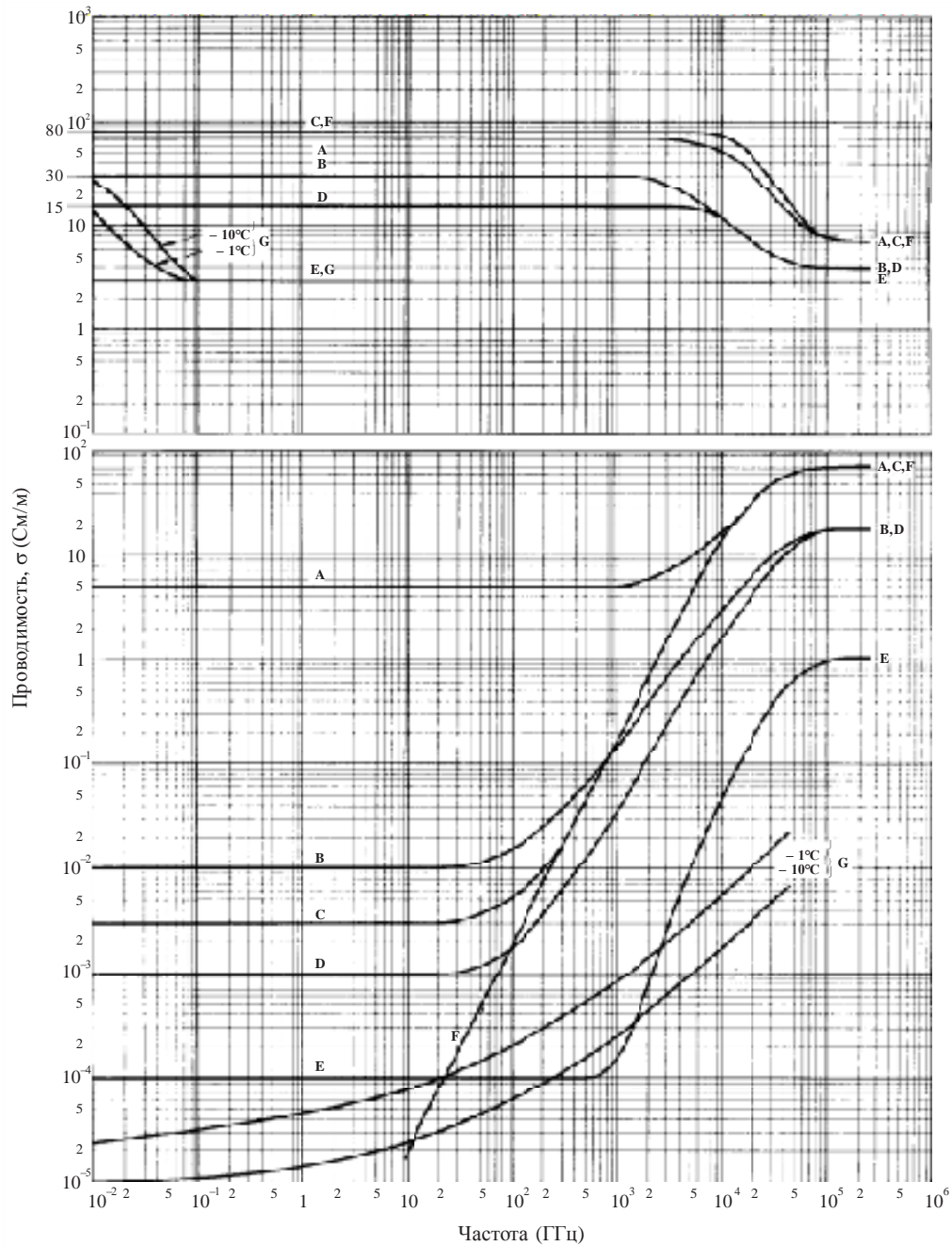


P0527-13

Дополнение**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 14 повторяет рисунок 1, 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.386 и МСЭ-R P.832.

РИСУНОК 14

Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r и проводимость σ 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)

P.0527-14