

ВЛИЯНИЕ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗЕМНОЙ ВОЛНЫ ДКМВ ДИАПАЗОНА

А.С. Яценко¹, С.В. Кривальцевич^{1,2}, Т.А. Беляева³

¹Институт радиофизики и физической электроники

Омского научного центра СО РАН, Омск, Российская Федерация

²Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация

³Омский государственный педагогический университет, Омск, Российская Федерация

Приведены результаты модельного расчёта ослабления земной волны ДКМВ диапазона при разных параметрах подстилающей поверхности. В процессе расчёта использовались как значения комплексной диэлектрической проницаемости почвы, найденные по модели Добсона, так и полученные в результате лабораторных измерений. Лабораторные измерения проводились при положительных и отрицательных температурах. Показано, что использование модели Добсона при расчёте комплексной диэлектрической проницаемости почв в ДКМВ диапазоне сопряжено с получением некорректных данных.

Ключевые слова: земная волна, комплексная диэлектрическая проницаемость, ДКМВ, подстилающая поверхность.

THE INFLUENCE OF UNDERLAYING SURFACES RADIOPHYSICAL CHARACTERIS ON THE HF GROUND WAVE PROPOGATION

A.S. Yashchenko¹, S.V. Krivaltsevich^{1,2}, T.A. Belyaeva³

¹Institute of Radiophysics and Physical Electronics OSC SB RAS, Omsk, Russian Federation

²Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, Omsk, Russian Federation

³Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russian Federation

The results of a model calculation of the ground wave attenuation in the HF band for different parameters of the underlying surface are presented. In the calculation process, used both the values of the complex dielectric constant of the soil, found by the Dobson model, and obtained as a result of laboratory measurements. The laboratory measurements were carried out at temperatures below and above zero degree. It is shown that the Dobson model does not allow the calculation of the correctly value's complex dielectric permittivity of soils in the HF band.

Keywords: ground wave, complex permittivity, HF, underlying surface.

Информация о радиофизических характеристиках почв востребована при решении научно-технических задач, связанных с распространением и взаимодействием радиоволн с подстилающей поверхностью. Почвы естественного сложения на частотах выше 1 ГГц можно рассматривать как дисперсную смесь (совокупность компонент, не вступающих друг с другом в химическую реакцию) следующих компонент: обломков минералов, органических веществ, воздуха, воды и/или льда. Магнитная проницаемость этих компонент почвы близка к единице. По этой причине характер взаимодействия электромагнитного поля с подобной структурой определяется значением её комплексной диэлектрической проницаемости (КДП). Величина КДП почвы зависит от объёмных долей и КДП каждой из компонент, составляющих почву. Известные на данный момент модели КДП смесей носят эмпирический и полумпирический характер; строгая теория диэлектрических смесей не создана. На частотах ниже 1 ГГц (особенно в глинистых почвах с большой удельной поверхностью) сильное влияние на КДП оказывают релаксационные процессы, обусловленные поляризацией межфазных границ, приводящие к возрастанию действительной и мнимой частей КДП при уменьшении частоты.

В соответствии с решением Международного союза электросвязи (МСЭ) для расчета КДП почвы рекомендовано использовать модель Добсона [1; 2]. Входными параметрами модели выступают удельные содержание трёх гранулометрических фракций (песка, глины и ила), плотность сухого сложения, объёмная влажность и частота. Диапазон размеров, соответствующей той или иной гранулометрической фракции, определяется согласно классификации, принятой в USDA (United States Department of Agriculture) (см. табл. 1). Данная классификация отличается от используемой в отечественном почвоведении (см. табл 2), что усложняет процесс расчёта КДП по модели Добсона для почв, расположенных на территории России.

Таблица 1

Классификация механических элементов почвы USDA

<i>Гранулометрическая фракция</i>	<i>Размер, мм</i>
Песок (Sand)	0,05–2
Ил (Silt)	0,002–0,05
Глина (Clay)	<0,002

Таблица 2

Классификация механических элементов почвы по Н.А. Качинскому

<i>Гранулометрическая фракция</i>		<i>Размер, мм</i>
Камни		>3
Гравий		1–3
Песок	крупный	0,5–1
	средний	0,25–0,5
	мелкий	0,05–0,25
Пыль	крупная	0,01–0,05
	средняя	0,005–0,01
	мелкая	0,001–0,005
Ил	глинистый	0,0005–0,001
	коллоидный	0,0001–0,0005
Коллоиды		<0,0001

Изначально модели КДП почв создавались для нужд одной из технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – спутниковой микроволновой радиометрии. Модель Добсона построена на основе данных экспериментальных измерений диэлектрической проницаемости пяти почв на частотах от 1,4 до 18 ГГц. Непригодность этой модели на частотах ниже 1 ГГц признали сами авторы, опубликовав результаты измерений КДП четырех почв с содержанием глины от 5 до 20 % (по классификации USDA) в диапазоне частот 0,3–1,3 ГГц и новую диэлектрическую модель [3]. Модель Добсона широко использовалась при обработке данных ДЗЗ из космоса на частотах выше 1 ГГц вплоть до середины 2010-х годов. Значения КДП почвы в ДКМВ диапазоне, измеренные в лабораторных условиях и рассчитанные по модели, приведённой в «МСЭ ITU-R P.527-4» [2], существенно отличаются (см. рис. 1). В пользу достоверности данных о КДП, полученных в процессе лабораторных измерений, свидетельствует факт использования признанных в мировом научном сообществе методов [4].

Данные о КДП почв востребованы при моделировании процесса распространения радиоволн. Использование недостоверных данных о КДП почв приводит к некорректному прогнозу характера распространения земных волн и ошибкам при расчёте коэффициента отражения пространственной волны от подстилающей поверхности.

В процессе расчётов нами использовались данные о КДП двух типов почв (суглинка и супеси), полученные в процессе лабораторных измерений при температурах +1 и –15 °С, а также рассчитанные по модели Добсона для температуры +1 °С. В процессе замерзания почвы её КДП резко уменьшается (см. рис. 2). Это явление объясняется резким уменьшением действительной и мнимой части КДП воды в процессе её фазового перехода.

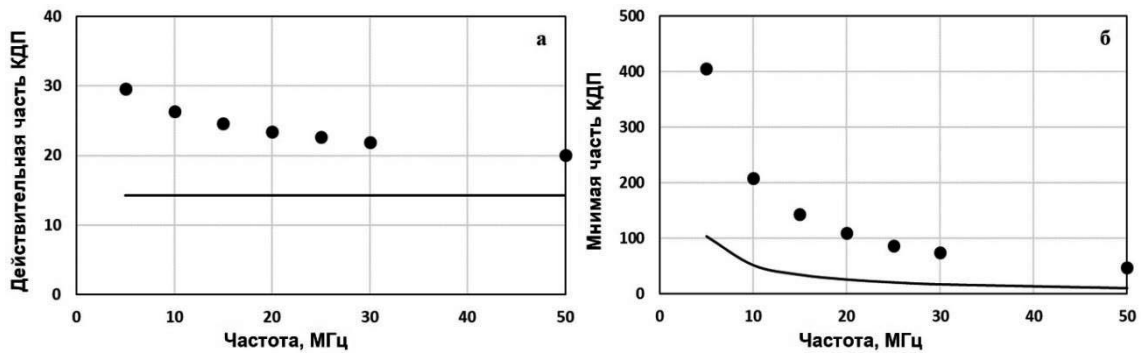


Рис. 1. Зависимость действительной (а) и мнимой (б) части КДП илистого суглинка, рассчитанной по модели, приведённой в МСЭ (линия), измеренной в лабораторных условиях (круглые маркеры); объёмная влажность почвы 26 %

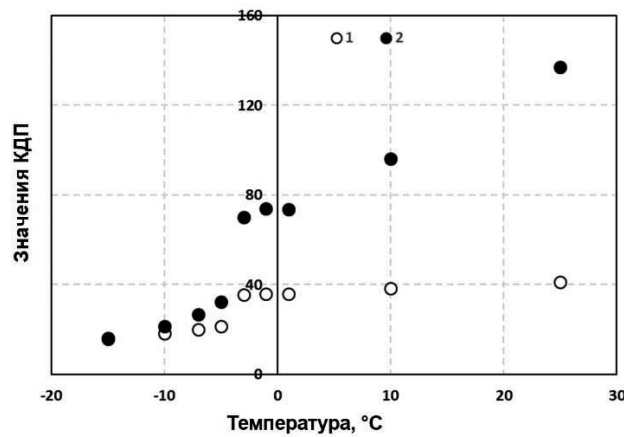


Рис. 2. Температурные зависимости мнимой (1) и действительной (2) части КДП суглинка, измеренной в лабораторных условиях на частоте 10 МГц

Значения ослабления земной волны рассчитывались в приближении плоской земли. Для расстояний в несколько десятков километров от передатчика подобное допущение не приводит к возникновению существенных погрешностей в расчётах. В процессе вычисления ослабления земной волны использовалось выражение, приведённое в [5]:

$$U \approx \frac{2+0,3|\rho|}{2+|\rho|+0,6|\rho|^2} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{ikR(\epsilon-1)}{2\epsilon^2} \quad (2)$$

где U – ослабление земной волны, ρ – приведённая длина (при расчётах используется абсолютное её абсолютное значение), k – волновое число, R – расстояние, ϵ – КДП, i – мнимая единица. Формулы справедливы для расчёта ослабления земных волн в средне- и коротковолновом диапазонах, испущенных вертикальным полуволновым вибратором, расположенным вблизи границы раздела «подстилающая поверхность–атмосфера».

Результаты расчёта U приведены на рис. 3–4.

Как можно видеть из приведённых данных, наиболее отличия в найденных значениях U наблюдаются при малых влажностях и на низких частотах. Объяснить расхождение результатов можно лишь тем фактом, что эмпирические данные, лежащие в основе модели Добсона, были получены в дециметровом и сантиметровом диапазонах волн; т. е. использование модели в коротковолновом диапазоне волн неприемлемо. Результаты ослабления земной волны, найденные по данным о КДП при положительной и отрицательных температурах, также отличаются. Затухание земной волны над замёрзшей почвой происходит быстрее (см. рис. 5). Причиной этого является тот факт, что КДП замёрзшей почвы меньше, а толщина скин-слоя вблизи её поверхности больше, чем у незамёрзшей почвы. Это способствует более интенсивному оттоку энергии в диэлектрик и более быстрому затуханию земной волны.

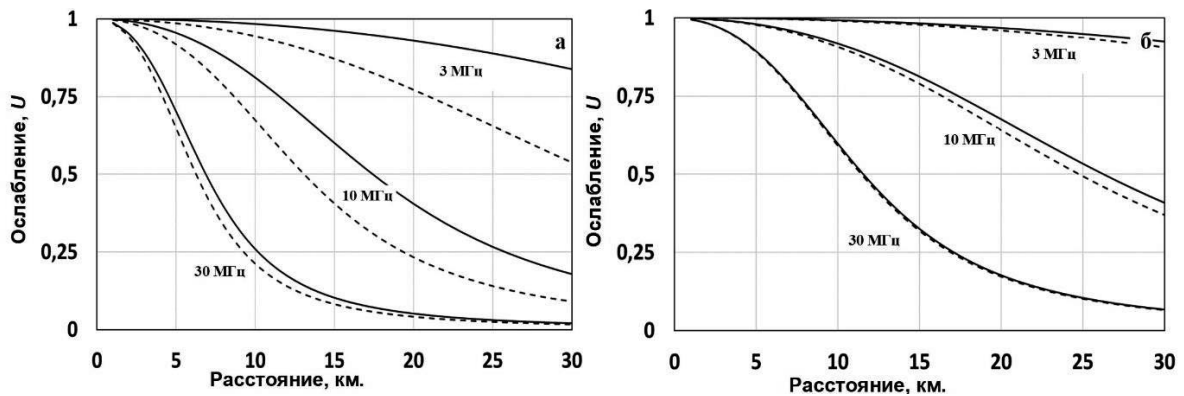


Рис. 3. Зависимость ослабления земной волны от расстояния (расчёт проведён для супеси с объёмными влажностями 9,5% (а) и 36,5% (б) при температуре +1 °С, непрерывная линия – модельные данные КДП, пунктирная линия – лабораторные данные о КДП)

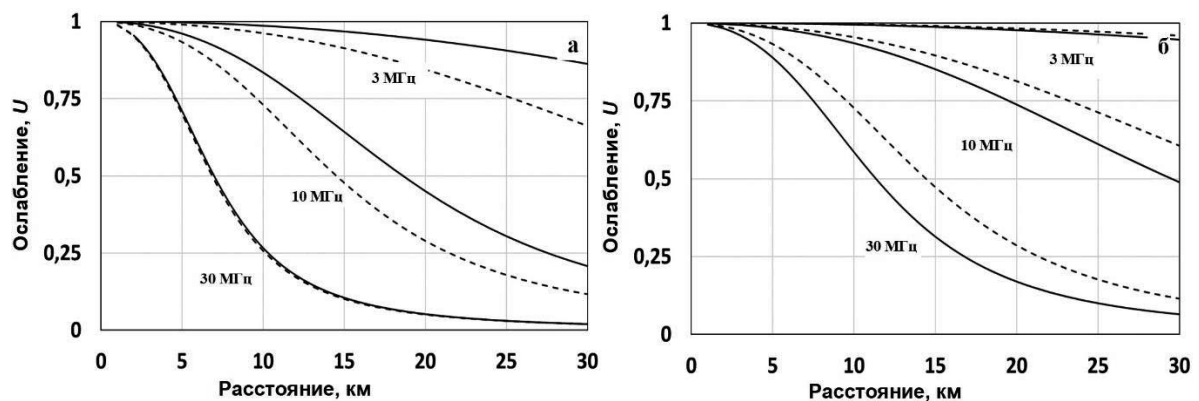


Рис. 4. Зависимость ослабления земной волны от расстояния (расчёт проведён для суглинка с объёмными влажностями 10,1% (а) и 34,2% (б) при температуре +1 °С, непрерывная линия – модельные данные КДП, пунктирная линия – лабораторные данные о КДП)

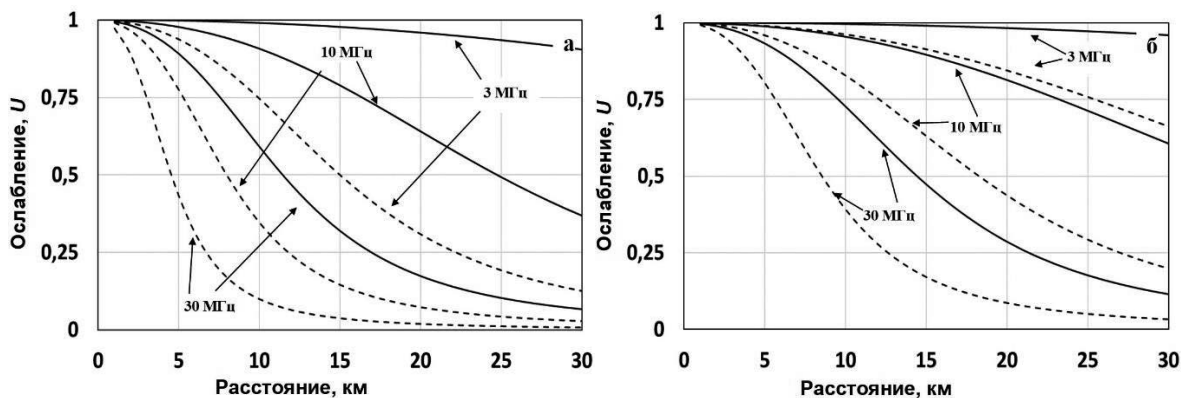


Рис. 5. Зависимость ослабления земной волны от расстояния (расчёт проведён для супеси (а) и суглинка (б) с объёмной влажностью 36,5 % и 34,2 % соответственно; непрерывная линия – данные о КДП при положительных температурах, пунктирная линия – данные о КДП при отрицательных температурах, Данные о КДП получены в процессе лабораторных измерений)

Таким образом, проведённые расчёты продемонстрировали:

- важность использования в процессе расчётов характеристик радиолиний КВ диапазона корректных данных о КДП почв;

• более интенсивное затухание земной волны при распространении над замёрзшей почвой.

Использование некорректных данных о КДП почв может привести к значительным ошибкам в оценке состояния канала распространения земной волны. Дальнейшее развитие работ будет связано с созданием корректной модели КДП почв в коротковолновом частотном диапазоне и её внедрением в рекомендации МСЭ.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН в соответствии с Программой ФНИ ГАН на 2013–2020 годы (номер госрегистрации проекта в системе ЕГИСУ НИОКТР АААА-А19-119052890058-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., El-Rayes M.A.* Microwave dielectric behavior of wet soil. Part II: Dielectric mixing models // *IEEE Trans. on Geosci and Remote Sens.* 1985. Vol. GE-23. No. 1. P. 35–45.
2. Electrical characteristics of the surface of the Earth. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-rec/p/R-REC-P.527-4-201706-I!!PDF-E.pdf (дата обращения: 31.08.2019).
3. *Peplinski N.R., Ulaby F.T., Dobson M.C.* Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3-GHz range // *IEEE Trans Geosci. and Remote Sens.* 1995. Vol. 33, no. 3. P. 803–807.
4. *Bobrov P.P., Repin A.V., Rodionova O.V.* Wideband Frequency Domain Method of Soil Dielectric Property Measurements // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* Vol. 53, no. 5, pp. 2366–2372, May 2015.
5. *Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г.* Распространение радиоволн. М.: Лёнд, 2009. 496 с.