

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН, РАДИОЛОКАЦИЯ И ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

УДК 537.226

В. Г. Сугак, И. С. Бондаренко, А. В. Сугак

О ПРОТИВОРЕЧИИ ДАННЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОД ГРУНТА

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: sugak@ire.kharkov.ua*

Изложены результаты сравнения теоретических моделей диэлектрических свойств пород грунта с данными, непосредственно получаемыми из результатов радиолокационного подповерхностного зондирования. Показано, что частотная дисперсия погонного затухания радиоволн в распространенных породах грунта существенно меньше, а фазовой скорости распространения – существенно больше предсказанной в теоретических моделях. Приведены соображения о физическом механизме этих отличий, который, как предполагается, связан с влиянием давления окружающего грунта на его частицы и поровое пространство. Ил. 11. Библиогр.: 24 назв.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, удельная проводимость, радиолокатор подповерхностного зондирования, грунт.

Одной из проблем в подповерхностном радиолокационном зондировании является учет частотных зависимостей погонного затухания и особенно фазовой скорости распространения радиоволн (частотной дисперсии) в грунте, которые обусловлены, в частности, частотными зависимостями его электрических характеристик. За счет этих зависимостей возникают значительные искажения зондирующего сигнала, что ограничивает полосу частот зондирующего сигнала. Практически можно говорить о доминирующем вкладе самой среды на результат зондирования. Даже объекты можно рассматривать в некотором приближении как неоднородности подповерхностной структуры грунта.

В практике для исследования процессов распространения и рассеяния радиоволн в диспергирующих средах используется компьютерное моделирование, в котором основной составной частью является модель зависимости электрических характеристик различных типов грунтов от таких характеристик, как объемная влажность, соленость, текстура, литологический состав грунта и т. д.

Особенно важно иметь адекватную реальным грунтам модель при разработке методов и алгоритмов восстановления физических свойств пород грунта по результатам подповерхностного зондирования.

В литературе описано множество моделей электрических характеристик пород грунта для разных частотных диапазонов.

Классические модели, определяющие диэлектрические свойства пород грунта путем рассмотрения смеси пограничного слоя воды, обволакивающей частицу грунта, и воздушной фракции, не описывали адекватно поведение комплексной диэлектрической проницаемости различных пород грунта.

Относительно недавно *J. R. Wang* и *T. J. Schmutge* [1] предложили эмпирическую

модель, основанную на смеси связанной с частицами грунта воды, свободной воды, сухого грунта и воздуха. В этой модели комплексная диэлектрическая проницаемость смеси определяется линейной комбинацией данных, полученных при двух предельных значениях концентрации влаги:

– при концентрации значительно меньшей или равной максимальному значению связанной водной фракции;

– при концентрации влаги, существенно превышающей это значение.

При этом удельное содержание связанной воды рассматривается как свободный параметр, который во многом определяется текстурой пород грунта. Второй свободный параметр учитывает изменения затухания за счет проводимости в зависимости от содержания воды для каждого типа грунта.

Несколько другая модель была предложена *Wang* [2]. В ней система грунт–вода описывается дебаевским типом релаксации в пределах ограниченного диапазона частот применительно к модели, развитой *Schwarz* [3]. При выполненных оценках статической диэлектрической проницаемости ϵ_s и ее предельной величине на высоких частотах ϵ_∞ это приближение адекватно описывает данные, измеренные в диапазоне 0,3...1,4 ГГц. При этом используются два свободных параметра, а именно ширина энергии активации почвенного раствора и средняя частота релаксации смеси грунт–вода для заданной концентрации породы грунта и воды.

Еще одно приближение, в котором признается важность связанной воды, было предпринято в работе *Wobschall* [4]. В этой модели комбинируются твердые породы грунта, недиспергированная вода (вода в трещинах), диспергированная вода, обволакивающая частицы грунта, недиспергированная вода, заполняющая более

крупные поры грунта и воздух. Эти компоненты комбинируются постепенно в 4 стадии, используя двухфазную модель смеси. Для каждого грунта приближение требует трех настраиваемых параметров: водную фракцию в «трещинах», проводимость этой фракции и диспергированную водную фракцию. Модель удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными в диапазоне частот 1...100 МГц, которая лежит значительно ниже значения частоты релаксации молекул чистой воды.

Диэлектрические свойства грунтов и пород детально обсуждались также в работах [5–7] и др., где авторы теоретически в деталях рассматривали эффект микроскопического распределения жидкости на диэлектрические свойства частично насыщенных водой пород.

Результаты многочисленных экспериментальных исследований грунтов типа бурых суглинков, проведенных в лабораторных условиях [8], показали их удовлетворительное совпадение с теоретическими моделями.

В работах [9–11] отмечается важность проведения полевых измерений на частотах ниже 1 ГГц, предложены измерительные инструменты для этого и приводятся экспериментально измеренные частотные зависимости диэлектрических характеристик насыщенного водой чистого песчаника, показывающие, что пористость не всегда играет доминирующую роль в поведении этих зависимостей; часто существенно больше влияет текстура породы.

В работах [12–15] отмечается, что частотная зависимость диэлектрической проницаемости пород, содержащих сланцевую глину и просто глину, может значительно отличаться от ожидаемых теоретических зависимостей, которые удовлетворительно работают применительно к «чистым» фракциям. В этих случаях необходимо учитывать геометрические и текстурные параметры пород.

В работах [16, 17] также указывается на то, что диэлектрическая проницаемость смеси может существенно возрастать в проводящем остоле пород грунта.

Однако в мировой литературе практически отсутствует сравнение теоретических моделей с результатами, получаемыми непосредственно из данных радиолокационного подповерхностного зондирования. Большинство экспериментальных данных получены путем измерения диэлектрических характеристик образцов грунта в лабораторных условиях после их извлечения из среды. При этом устраняется влияние давления окружающего грунта на частицы и поровое пространство измеряемого образца.

В настоящей работе исследуются вопросы, связанные с точностью описания частотных

зависимостей электрических характеристик реальных грунтов, которые получаются из наиболее распространенных моделей, путем сопоставления модельных результатов с результатами практического зондирования. Для этих целей применялись разработанные экспериментальные модели георадаров, в которых используется зондирующий сигнал со ступенчатым изменением его несущей частоты в заданном диапазоне. Возможности такого зондирующего сигнала применительно к оцениванию электрических характеристик грунта и отдельных подповерхностных объектов достаточно подробно изложены в работах [18, 19].

Особенно интересным является проверка адекватности частотной дисперсии электрических характеристик различных типов грунтов, заложенных в этих моделях, реальным характеристикам, получаемым из данных радиолокационного зондирования. Заметим, что эти дисперсионные зависимости можно получить, используя георадар со ступенчатым изменением частоты зондирующего сигнала. Особенно хорошо они выделяются при измерении фазовой структуры отраженных сигналов. Подробно эти вопросы изложены в работе [20], поэтому здесь они не рассматриваются.

Как уже указывалось, практически все экспериментальные работы, посвященные оценкам электрических характеристик грунтов и их частотным зависимостям, были получены в лабораторных условиях на образцах, вынутых из грунта, т. е. не в естественных условиях и особенно не на реальных глубинах, где может сказываться влияние давления верхних слоев грунта. Некоторые литературные данные (например, [21]) свидетельствуют о том, что давление, особенно в напластованных слоях грунта, может приводить к появлению анизотропии электрических характеристик, т. е. к отличию этих характеристик в вертикальном и горизонтальном направлениях. Это же давление может менять и частотные зависимости электрических характеристик грунта, особенно на глубинах более 3...5 м.

Рассмотрим вначале основные теоретические модели электрических характеристик различных типов грунтов, которые описывают их зависимость от частоты при различной влажности, солености, пористости, процентном содержании твердых фракций и т. д. Затем сравним результаты расчета электрических характеристик и определяемые ими погонное затухание и фазовую скорость распространения радиоволн с данными, получаемыми непосредственно из результатов радиолокационного зондирования.

1. Влияние влажности, степени засоленности, пористости на электрические характеристики грунта. Существует несколько подходов к расчету электрических свойств грунта. В идеале модель должна была бы учитывать

влияние множества различных факторов на диэлектрические свойства грунта. Такими факторами являются объемная плотность грунта, текстура, композиционные свойства (распределение размера частиц и их минералогия), объемная концентрация водных компонентов (обычно в виде свободной и связанной воды), воздух, степень солености и температура.

Одной из простых моделей электрических характеристик грунта является рефракционная модель [1], в которой его комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) определяется взвешенной суммой проницаемостей каждой из слагаемых, возведенных в дробную степень (так называемая рефракционная модель). Дисперсионные свойства смеси в данной модели учитываются зависимостью времени релаксации молекул воды от солености и температуры. Данная модель рассчитана на диапазон длин волн короче 0,6 м и является практически полностью эмпирической моделью.

В другой модели, по которой производились расчеты в данной работе, в диапазоне частот от нескольких десятков до нескольких сотен мегагерц грунт согласно [22] рассматривается с точки зрения его диэлектрических характеристик как статистическая смесь твердых частиц, воздуха, пленочной влаги и порового электролита. Фактически эта модель очень близка к модели, описанной в работе [7]. Для выражения эффективной КДП этой смеси через проницаемости и объемные концентрации компонент p_i , где p_i – отношение объема компоненты к полному объему образца, использовалась формула Беренцвейга (1), которая, как это следует из литературных источников, например [22], является неплохим приближением к экспериментальным данным:

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} + \frac{\sum_{i=0}^k p_i \frac{\varepsilon_i - \bar{\varepsilon}}{\varepsilon_i + 2\bar{\varepsilon}}}{\sum_{i=0}^k p_i \frac{1}{\varepsilon_i + 2\bar{\varepsilon}}}, \quad (1)$$

где $\bar{\varepsilon} = \sum_{i=0}^k p_i \varepsilon_i$ – оценка КДП смеси; k – количество фаз в смеси ($k = 2$ для трехфазной смеси); n – пористость грунта; $p_0 = n - p_1$ – объемное содержание воздуха; p_1 – объемная влажность; p_2 – объемное содержание твердой фазы; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость воздуха; ε_2 – КДП твердой фазы (кварц, полевой шпат); ε_1 – КДП электролита и пленочной влаги, представляющая собой сумму двух слагаемых:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_d + j\varepsilon_{con}'' \quad (2)$$

В выражении (2) ε_d – диэлектрическая проницаемость воды с учетом солености, определяемая по формуле Дебая [7] с учетом экспериментальной модели зависимости параметров, входящих в выражение, от степени солености и температуры, предложенной в работе [21], а ε_{con}'' – потери, обусловленные ионной проводимостью. В результате:

$$\varepsilon_l = \left[\varepsilon_{sco} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{sco}}{1 + (\omega\tau_s)^2} \right] + \dots + j \left[\frac{\omega\tau_s(\varepsilon_s - \varepsilon_{sco})}{1 + (\omega\tau_s)^2} + \frac{\sigma_i}{\omega\varepsilon_0} \right], \quad (3)$$

где ω – круговая частота; $\varepsilon_s = 81$ и $\varepsilon_{sco} \cong 4,9$ – предельные значения диэлектрической проницаемости при $\omega \rightarrow 0$ и $\omega \rightarrow \infty$; τ_s – время релаксации молекул воды; σ_i – ионная проводимость.

Указанная модель является разновидностью широкоиспользуемых моделей, основанных на смесях различных пород грунта, в основном песка, глины и ила (осадочных пород), воды в разных состояниях (например, связанной и свободной), воздуха и соляного раствора, так называемая 4-компонентная модель, которая подробно изложена в работе [7]. Для аппроксимации реально встречающихся пород грунта широко используется треугольная диаграмма текстурных классов грунта [23] (рис. 1), которая использовалась для определения процентного состава композитных пород для требуемого типа грунта.

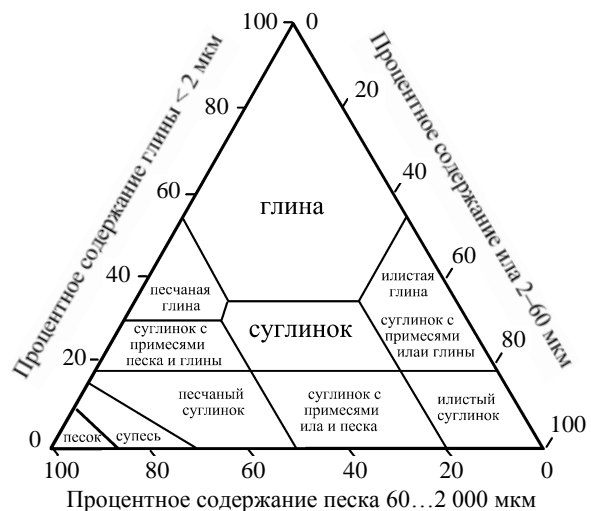


Рис. 1. Треугольная диаграмма текстурных классов для определения процентного состава композитных пород для требуемого типа грунта

На длинах волн больше 10 см необходимо учитывать ионную проводимость. В работе [22] приводятся экспериментальные зависимости ионной проводимости песка и глины от длины волны.

Ниже приведены скорректированные эмпирические формулы, описывающие более точно зависимости мнимой части диэлектрической проницаемости, определяемой ионной проводимостью глины и песка, от длины волны и объемной влажности [19]

$$\begin{aligned} \varepsilon'' &= 306,6p^{1,6} / \lambda^{0,5} \text{ (глина);} \\ \varepsilon'' &= 8,634p^{1,1} \lambda \text{ (песок),} \end{aligned} \quad (4)$$

где p – влажность; λ – длина волны.

Таким образом, модель учитывает несколько факторов, влияющих на электрические характеристики грунта, а именно: соленость воды, температуру, объемную влажность, твердые фракции (песок и глина) и процентное содержание их в смеси. Данная модель электрических характеристик наиболее часто встречаемых на практике грунтов в диапазоне частот до 1 ГГц использовалась, в частности, для оценки искажений радиолокационных сигналов при прохождении их через слои грунта [19].

Для расчета ионной проводимости можно использовать модель, описанную в работе [7], в которой грунт рассматривается как смесь песка, глины, ила, воды с растворенной солью и воздуха, водяная фракция представляется в виде двух слоев. Первый слой располагается в непосредственной близости от частицы грунта, ионы воды в котором находятся в связанном состоянии с ионами частицы грунта. Во втором слое вода находится в слабой связи с молекулами частицы грунта.

В сухом грунте адсорбированные катионы удерживаются поверхностями отрицательно заряженных частиц, образованных в основном частицами глины. Избыточные катионы и связанные с ними анионы находятся в соляном осадке. Когда вода попадает в систему, соляной осадок растворяется, и адсорбированные катионы частично диффундируют в раствор в непосредственной близости от поверхности частиц. Однако электростатическое поле, определяемое частицами, препятствует этой диффузии, и результирующее распределение зарядов определяется уравнениями Пуассона–Больцмана. Согласно модели двойного электрического слоя Штерна–Гуи [5], плотность зарядов на сравнительно больших поверхностях частиц увеличивает концентрацию ионов в основном объеме раствора. Зависимость распределения ионов от расстояния определяется поверхностной плотностью зарядов, типом адсорбированных катионов, соленостью основного объема раствора, температурой и т. д.

Предполагается равномерное распределение зарядов, при этом их поверхностная плотность σ определяется величиной емкости катионного обмена (ЕКО). Под ЕКО понимают общее количество катионов одного рода, удерживаемых

почвой в обменном состоянии при стандартных условиях и способных к обмену на катионы взаимодействующего с почвой раствором.

На рис. 2 показано строение двойного ионного слоя Штерна–Гуи. Слой Штерна был введен для того, чтобы уменьшить очень большую концентрацию ионов, которая получалась бы из уравнения Пуассона при рассмотрении модели частицы пород в виде абстрактной точки.

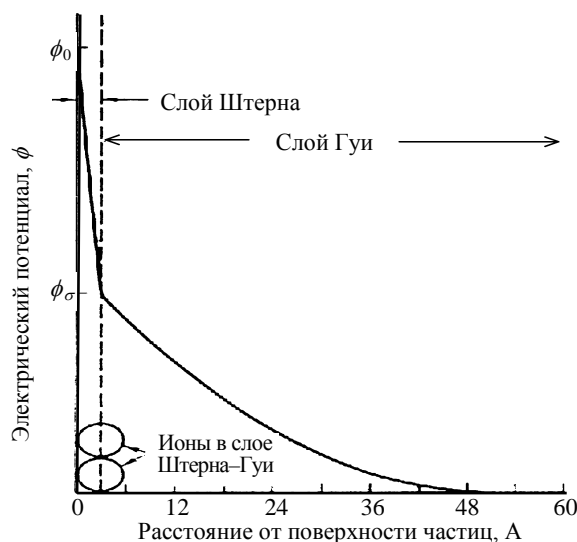


Рис. 2. Строение двойного ионного слоя Штерна–Гуи

Так как катионы обоих слоев Штерна и Гуи должны компенсировать поверхностную плотность заряда σ , то можно записать следующее выражение:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2, \quad (5)$$

где индексы 1 и 2 относятся к слоям Штерна и Гуи соответственно.

Полученное уравнение решается итерационным методом, в результате чего после соответствующих преобразований удастся записать полное выражение для средней удельной проводимости заданной породы грунта [7].

Макроскопические диэлектрические свойства системы, описывающей грунт, определяются простой смесью четырех компонент: сухих частиц грунта, слабо связанной воды в слое Гуи, сильно связанной воды в слое Штерна и воздуха.

В результирующей формуле для КДП смеси только выражение для диэлектрической проницаемости слабо связанной воды в слое Гуи является частотно зависимым, определяемым дебаевским типом релаксации:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_{fw} &= \varepsilon_{w\infty} + \frac{\varepsilon_{w0} - \varepsilon_{w\infty}}{1 + (2\pi f \tau_w)^2}; \\ \varepsilon''_{fw} &= \frac{2\pi f \tau_w (\varepsilon_{w0} - \varepsilon_{w\infty})}{1 + (2\pi f \tau_w)^2} + \frac{\sigma_{mv}}{2\pi \varepsilon_0 f}, \end{aligned} \quad (6)$$

где ε'_{fw} – реальная часть относительной диэлектрической проницаемости воды; ε''_{fw} – мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости воды; $\varepsilon_{w\infty}$ – предельное высокочастотное значение ε_w ; ε_{w0} – диэлектрическая проницаемость воды на постоянном токе; τ_w – время релаксации молекул воды; σ_{mv} – эффективная удельная проводимость воды, определяемая двойным электрическим слоем Штерна–Гуи.

Следует отметить, что в этой модели удельная проводимость, определяемая двойным ионным слоем, не зависит от частоты, а частотная зависимость обусловлена формулой (6) для мнимой части КДП водной фракции, в которой удельная проводимость делится на частоту. При комбинировании с другими фракция суммарная частотная зависимость будет меньше частотной зависимости водной фракции.

Далеко не всегда теоретические модели адекватно описывают диэлектрические свойства пород грунта. Например, в работе [10] дается обоснование того, что частотная дисперсия электрических характеристик содержит больше информации о физических характеристиках пород, чем это предполагалось ранее.

Например, из рис. 3, взятого из этой работы, видно, что пористость даже такой породы как песчаник (не содержащей глины), в меньшей степени определяет частотную дисперсию его диэлектрических свойств, чем геометрические и текстурные характеристики породы. В частности, две кривые, соответствующие примерно одинаковой пористости $\phi = 12,7\%$, радикально отличаются по степени частотной дисперсии.

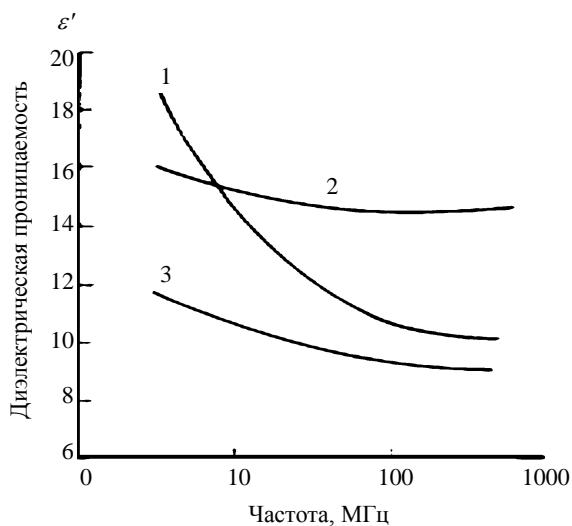


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости насыщенного водой песчаника при разной пористости от частоты: 1 – $\phi = 12,9\%$; 2 – $\phi = 24,6\%$; 3 – $\phi = 12,7\%$

2. Сравнение данных, получаемых непосредственно по результатам георадарного зондирования, с данными существующих моделей. При выполнении большого количества геофизических изысканий с применением разработанных экспериментальных моделей георадаров, в которых использовался зондирующий сигнал со ступенчатым изменением его несущей частоты в диапазонах 90...300 и 500...900 МГц, были получены результаты, свидетельствующие о большей частотной дисперсии фазовой скорости распространения радиоволн в различных грунтах и существенно меньшей частотной зависимости погонного затухания радиоволн по сравнению с аналогичными расчетными зависимостями, получаемыми из существующих моделей электрических характеристик. Кроме этого, наблюдается несколько меньшее затухание в грунте, чем это предсказывается в теоретических моделях, что требует дальнейшего осмысливания и пересмотра существующих физических представлений об электрических и физических характеристиках типовых грунтов в их естественном состоянии.

Методы выделения информации о диэлектрических свойствах грунтов непосредственно из радиолокационных данных зондирования описаны достаточно подробно в работах [20, 24]. Они основаны на анализе таких характеристик отраженных сигналов, как скорость изменения фазы сигналов от глубины зондирования, смещений оценок глубины подповерхностных объектов при использовании низкочастотной и высокочастотной частей спектра зондирующего сигнала и т. д.

Начнем с данных, касающихся затухания радиоволн при их распространении в реальных грунтах. На рис. 4 приведены типичные обработанные сигналы с выхода фазового детектора георадара, которые характеризуют распределение отражений зондирующего сигнала от неоднородностей подповерхностной структуры грунта типа суглинков по глубине, при проходе по сравнительно длинному (более 70 м) профилю движения георадара.

По оси абсцисс отложена глубина, а по оси ординат – относительная амплитуда в логарифмическом масштабе. Мы видим, что в реальных слоях грунта всегда происходит отражение в каждом элементе разрешения по глубине, определяемым шириной спектра зондирующего сигнала, за счет присутствия токов проводимости и смещения, обусловленных конечной проводимостью пород грунта и наличием небольших неоднородностей (текстуры грунта, объемной влажности и т. д.). Мы не знаем коэффициент отражения, но статистически он распределен примерно одинаково в каждом элементе разрешения. Ход всех кривых, как видно из рисунка, примерно подчиняется степенной зависимости от глубины с пока-

затем степени около -13 . Для сравнения на этом же рисунке приведены полученные расчетным путем две пунктирные прямые, ограничивающие область изменений затухания, характерные для практически всех типов суглинка, при значениях объемной влажности от 10 до 15 %. Расчеты проводились с использованием вышеописанной модели электрических характеристик грунта, состоящего из смеси песка, глины и воды. Видно, что экспериментальные данные лежат несколько выше теоретических кривых. Так как объемная влажность в реальных суглинках обычно выше 15 %, это означает, что мы не должны были бы видеть отражения на глубинах более 10...15 м, что противоречит нашим данным зондирования в реальных грунтах. Если учесть, что с ростом глубины растет пятно облучения элемента разрешения, но не пропорционально r^2 , где r – глубина в метрах (причиной этого является затухание в породах грунта [18]), то это приведет к несколько большему результирующему показателю степени затухания сигналов от глубины. Однако все равно затухание в грунте, определяемое моделью, существенно больше, чем наблюдаемое в экспериментах применительно к тем же типам грунтов.

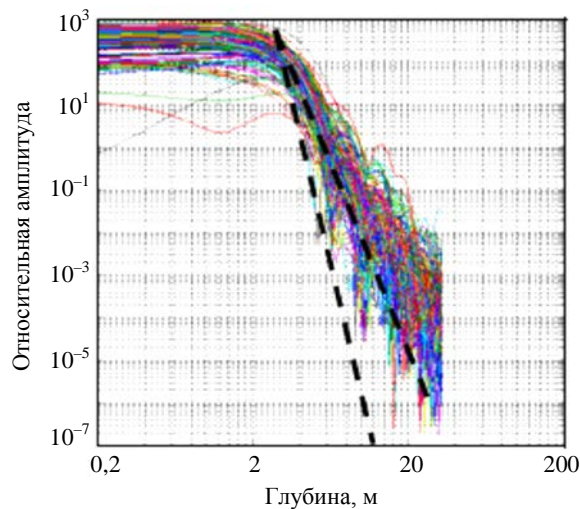


Рис. 4. Спектры сигналов на выходе фазового детектора приемника георадара

Затухание радиоволн в грунте определяется формулой, в которую входят как удельная проводимость, так и диэлектрическая проницаемость:

$$\alpha = \omega \left[\frac{\mu \epsilon}{2} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

где $\operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon}$ – тангенс диэлектрических потерь породы.

На частотах 0,1...1 ГГц основной вклад в величину затухания вносит удельная проводимость. Для того чтобы теоретическая модель более или менее правильно описывала наблюдаемые данные, необходимо уменьшать в 1,5–1,7 раза расчетные значения удельной проводимости (в частности, те значения, которые использовались для рис. 4).

Более противоречащим теории фактом является существенно меньшая частотная зависимость погонного затухания в грунте от частоты в экспериментах по сравнению с данными, предсказываемыми теорией.

Для проверки этого предположения рассмотрим сигнал с выхода фазового детектора приемника георадара со ступенчатым изменением его несущей частоты, соответствующий отражению от какой-либо границы между двумя разными слоями грунта, например, между слоем суглинка и супеси, как на рис. 5. На рисунке вдоль оси абсцисс вместо времени отложено изменение частоты зондирующего сигнала. Подробно такое представление сигналов изложено в работе [24]. Важным является то, что затухание амплитуды сигнала во времени практически совпадает с ходом кривой, определяющей зависимость затухания радиоволн от частоты в диапазоне частот сканирования георадара.

Для выделения этого временного сигнала применялся узкополосный фильтр, настроенный на соответствующую компоненту сигнала в окрестности указанной отражающей границы. Этот отфильтрованный сигнал представлен на рис. 5.

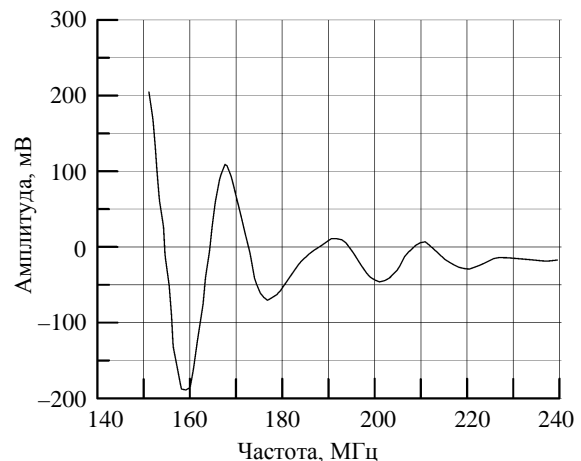


Рис. 5. Отфильтрованный сигнал, который соответствует отражению от границы, отделяющей слой суглинка и песка

Видно, что изменение амплитуды сигнала в диапазоне сканирования его несущей частоты составляет около 20 дБ.

Рассмотрим теперь, что предсказывает теоретическая модель. Задавая параметры грунта (процентное содержание песка и глины, объемную влажность, соленость, температуру, диапазон частот и т. д.), можно промоделировать процесс распространения радиоволн в заданном слое грунта до какой-либо отражающей границы и назад к антенне георадара. Затем над сигналом совершаются те же преобразования, что и в приемнике георадара (перемножение с опорным сигналом и низкочастотная фильтрация). В результате можно получить сигнал на выходе фазового детектора в модели, который должен в какой-то мере быть похожим на экспериментально измеренный сигнал (см. рис. 5). На рис. 6, а представлен рассчитанный сигнал на выходе фазового детектора приемника георадара, соответствующий отражению от полностью отражающей границы, расположенной на глубине 6 м при том же диапазоне частот сканирования зондирующего сигнала, а на рис. 6, б – его амплитуда в логарифмическом масштабе по обеим координатным осям. Параметры грунта выбраны таким образом, чтобы соответствовать эксперименту (песок 90 %, глина 10 %, объемная влажность 15 %).

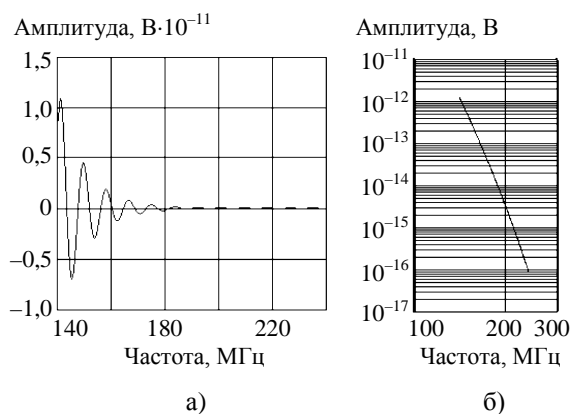


Рис. 6. Рассчитанный сигнал на выходе фазового детектора приемника георадара

Выделим тот факт, что затухание амплитуды сигнала даже при небольших концентрациях глины в процессе изменения несущей частоты составляет около 40 дБ, что на 20 дБ больше, чем в экспериментах.

Следующим существенно противоречащим теории фактом является частотная дисперсия диэлектрической проницаемости, которая вносит доминирующий вклад в частотную зависимость фазовой скорости распространения радиоволн в указанном диапазоне частот, определяемой выражением

$$v = 1 / \left[\frac{\mu \varepsilon}{2} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} + 1 \right]^{1/2}. \quad (8)$$

Выяснить это можно путем оценки частотной дисперсии фазовой скорости распространения радиоволн по результатам экспериментальных зондирований и сравнении их с расчетными данными.

Существует две методики этой оценки. Первая состоит в том, чтобы оценить глубину залегания какого-либо объекта по результатам зондирования в двух частях спектра зондирующего сигнала – в низкочастотной и высокочастотной. Смещение залегания объекта по глубине в этом случае будет прямо связано со степенью частотной дисперсии фазовой скорости распространения радиоволн. Детально этот вопрос рассмотрен в работе [24]. Затем, используя модель электрических характеристик грунта, можно теоретически рассчитать при тех же параметрах зондирующего сигнала (ширины спектра) и типа грунта, насколько будет смещаться автокорреляционная функция зондирующего сигнала при отражении от точечного объекта, расположенного на той же глубине, что и в эксперименте.

Вторая методика связана с оценкой фазовой структуры отраженных сигналов в тех же частях спектра зондирующего сигнала и последующим сравнением с расчетным результатом с использованием той же модели. Эта методика является более точной и позволяет оценивать частотную дисперсию фазовой скорости распространения радиоволн не только при наличии ярко выраженного подповерхностного объекта, но и в любом элементе разрешения. Однако она сравнительно громоздка и потребует значительного большего объема для изложения, поэтому мы воспользуемся первой методикой.

На рис. 7 приведены изображения двух подповерхностных объектов, один из которых (подземный коллектор) расположен на глубине около 7 м на рис. 7, а, а второй (неизвестный объект) – на глубине около 17 м. Левое изображение соответствует низкочастотной части спектра зондирующего сигнала (диапазон частот 140...190 МГц), а правое – высокочастотной части (190...240 МГц). Так как спектр зондирующего сигнала разбит на две половины, разрешающая способность по глубине существенно уменьшилась, но зато очень хорошо видно смещение объекта по глубине за счет частотной зависимости фазовой скорости распространения радиоволн в грунте. Так, смещение первого объекта (подземный коллектор) составляет около 3 м, а второго – уже 6–7 м за счет накопления искажений с глубиной.

Аналогичные результаты получаются и по второй методике. Наблюдаемое смещение глубины залегания неоднородностей грунта в двух частях спектра зондирующего сигнала составляет несколько метров на глубинах 7...10 м в зависимости от типа грунта и объемной влажности.

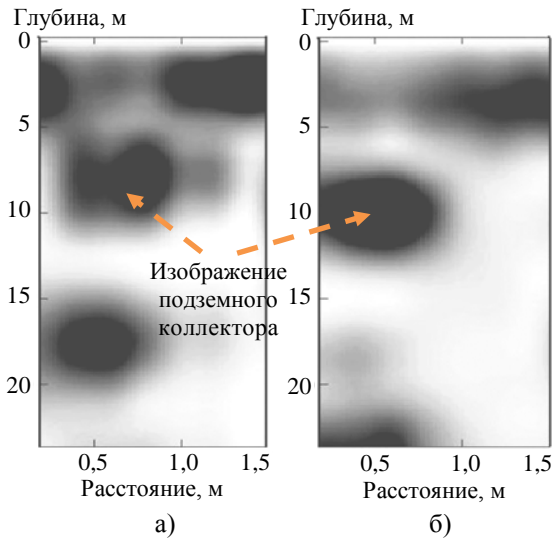


Рис. 7. Радиолокационные изображения двух подповерхностных объектов, полученных в низкочастотной (а) и высокочастотной (б) частях спектра зондирующего сигнала: а) – 140...190 МГц; б) – 190...240 МГц

Рассмотрим теперь для сравнения величины смещения глубины залегания объектов, получаемые в результате использования описанной выше модели. Методика моделирования детально изложена в работе [19]. Моделирование проводилось при тех же параметрах, характеризующих тип грунта, и для тех же значений ширины низкочастотной и высокочастотной частей спектра, что и для случая затухания радиоволн в грунте. На рис. 8 приведены автокорреляционные функции зондирующего сигнала при отражении от точечного подповерхностного объекта, залегающего на глубине около 7 м. Пунктирная кривая соответствует низкочастотной составляющей спектра зондирующего сигнала (диапазон частот 140...190 МГц), а сплошная кривая – высокочастотной части (диапазон частот 190...240 МГц).

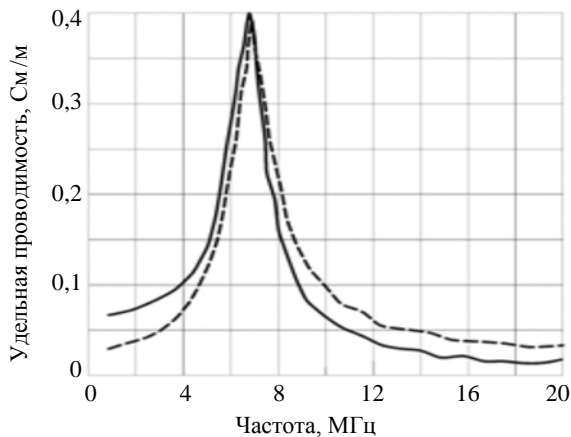


Рис. 8. Автокорреляционные функции зондирующего сигнала при отражении от точечного подповерхностного объекта, залегающего на глубине около 7 м (пунктирная кривая – высокочастотная часть спектра, сплошная – низкочастотная)

Из рисунка видно, что смещение объекта по глубине за счет частотной дисперсии фазовой скорости распространения радиоволн в грунте практически отсутствует. Этот результат существенно противоречит экспериментальным данным, в которых такое смещение достигает значения около 2–3 м при той же глубине залегания подповерхностного объекта.

Таким образом, мы получили результаты, свидетельствующие о том, что затухание радиоволн в грунте несколько меньше величин, предсказываемых существующими моделями электрических характеристик типовых грунтов. Также существенно меньше наблюдается частотная зависимость погонного затухания в грунте, в то время как частотная дисперсия диэлектрической проницаемости – существенно больше.

Для того чтобы скорректировать модель с целью получения более адекватных экспериментальным данным дисперсионных зависимостей, мы попытались изменить наклон частотных зависимостей диэлектрической проницаемости и удельной проводимости таким образом, чтобы результаты были более близкими к наблюдаемым экспериментальным данным. Для этого мы умножили получаемую в результате расчета функцию зависимости диэлектрической проницаемости и удельной проводимости грунта от частоты на

$$\text{множители } K(\omega) = \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^{\text{deg } r1}, \quad K(\omega) = \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^{\text{deg } r2}$$

соответственно, где ω_0 – начальная частота зондирующего сигнала, $\text{deg } r1$ и $\text{deg } r2$ – показатели степени, величины которых варьируются в пределах 0,7...0,9 и 0,5...0,6 соответственно. При этом значения удельной проводимости уменьшались в 1,5...2 раза. В итоге можно было получить для заданного типа грунта расчетные результаты по общему затуханию, частотной зависимости погонного затухания и частотной дисперсии диэлектрической проницаемости, которые становились похожими на данные, получаемые при экспериментальном зондировании в реальных средах.

Чтобы сравнить зависимости проводимости и относительной диэлектрической проницаемости смеси песка и глины (суглинок) от частоты при разной объемной влажности, рассчитанные по приведенной модели со скорректированными зависимостями, которые более точно описывают экспериментальные данные, мы приводим их на рис. 9 и 10.

На рис. 9 приведены зависимости удельной проводимости смеси песка и глины (суглинок) от частоты при разной объемной влажности, рассчитанные по приведенной модели (кривые 1–3), и по скорректированной модели (кривые 1'–3').

Параметры смеси: грунт – смесь песка (60 %) и глины (40 %), пористость грунта 0,25, объемная влажность – 21 % – кривые 1 и 1', 14 % – кривые 2 и 2' и 7 % – кривые 3 и 3'; соленость – 0,1 %. На рис. 10 приведены аналогичные зависимости для относительной диэлектрической проницаемости указанной смеси.

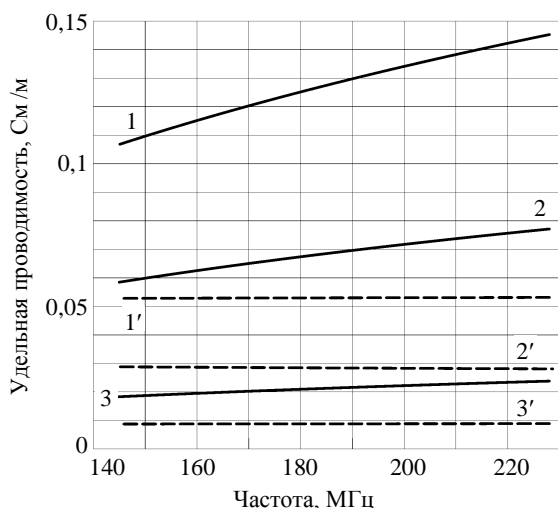


Рис. 9. Зависимости удельной проводимости суглинка от частоты при различной объемной влажности: 1 – $p_1 = 21\%$; 2 – $p_1 = 14\%$; 3 – $p_1 = 7\%$; сплошные линии – исходная модель, пунктирные линии – скорректированная модель

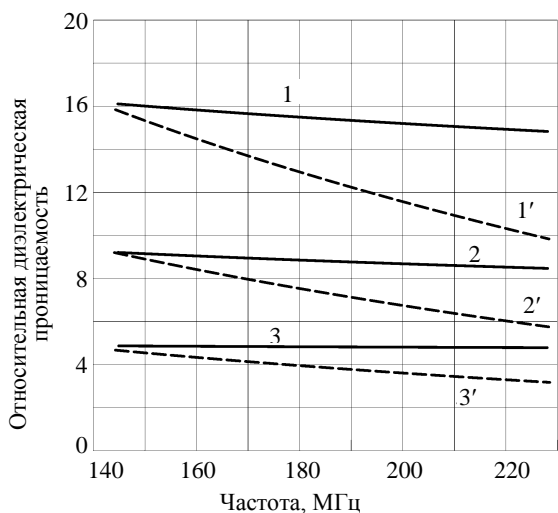


Рис. 10. Зависимости диэлектрической проницаемости суглинка от частоты при различной объемной влажности: 1 – $p_1 = 21\%$; 2 – $p_1 = 14\%$; 3 – $p_1 = 7\%$; сплошные линии – исходная модель, пунктирные линии – скорректированная модель

Отметим тот факт, что одна из скорректированных частотных зависимостей диэлектрической проницаемости (кривая 1') достаточно близка к кривой 1 на рис. 3, что косвенно подтверждает правильность наших выводов о боль-

шей частотной дисперсии диэлектрической проницаемости пород грунта по сравнению с теорией. Можно отметить также существенно меньшую частотную дисперсию скорректированной удельной проводимости грунта.

В данном случае применительно к удельной проводимости лучше работает модель Улаби [7], в которой последняя определяется двойным ионным слоем Штерна–Гуи и практически не зависит от частоты.

Другими словами слой Штерна–Гуи правильно определяет физику формирования проводимости в породах грунта и хорошо совпадает с данными измерений электрических характеристик пород грунта, проводимых в лабораторных условиях.

То, что наши данные свидетельствуют о несколько меньших значениях удельной проводимости, говорит о том, что нужно искать физическую природу появления этих отличий в естественных условиях, когда частицы грунта и воздух в поровом пространстве испытывают давление со стороны окружающего грунта.

Выводы. Проведенный анализ существующих моделей электрических характеристик грунтов и данные экспериментальных зондирований позволяют сделать следующие предположения о механизмах формирования диэлектрических свойств пород грунта и направлениях коррекции существующих модельных представлений. Прежде всего, коррекция модели электрических характеристик грунтов должна проводиться с учетом того, что повышенное на больших глубинах давление на частицы грунта и на поровое пространство может деформировать слегка слой Гуи слабосвязанной воды и влиять на концентрацию свободной воды в этом пространстве, которая не учитывается в модели, описываемой уравнениями (6). Для решения этой задачи необходимо привлекать уравнения фильтрации жидкости в грунте, в которых необходимо учитывать избыточное давление в порах грунта и возможную деформацию его частиц. Уравнения фильтрации могут позволить рассчитать эффект перераспределения воды из свободного состояния в порах в слой слабосвязанной воды, что может существенно изменить значения удельной проводимости и повлиять на результирующую КДП смеси в виде сухого грунта, воды в трех состояниях: слабосвязанной, сильносвязанной и в свободном состоянии в порах и воздуха, т. е. необходимо рассмотреть 5-компонентную модель смеси.

Кроме этого, необходимо искать физические механизмы появления существенно большей частотной дисперсии диэлектрической проницаемости пород грунта, чем это следует из теоретических моделей. Можно высказать следующие соображения.

Как уже упоминалось, на диэлектрические свойства пород грунта существенно влияет геометрия и текстура частиц грунта. В гетерогенной среде, какой является грунт, его частицы имеют сложную форму – от простых частиц, имеющих кристаллическую структуру разного размера, до небольших включений, которые имеют волокнистую структуру. При этом диэлектрические свойства композитных материалов зависят от того, как электромагнитное поле ориентировано относительно квазислоистой микроструктуры грунта [25]. Если поле ориентировано вдоль этой микроструктуры, то результирующая диэлектрическая проницаемость будет определяться выражением

$$\varepsilon_r = \sum_i \varepsilon_i \mathcal{G}_i, \quad (9)$$

где \mathcal{G}_i – объемная концентрация i -й фракции.

Если поле ориентировано перпендикулярно слоям этой микроструктуры, то

$$\varepsilon_r = \frac{1}{\sum_i \frac{\mathcal{G}_i}{\varepsilon_i}}. \quad (10)$$

Таким образом, комбинация этих формул применительно к определенной микроструктуре грунта может определить по-разному частотную зависимость результирующей диэлектрической проницаемости, хотя исходная частотная зависимость водной фракции будет всегда иметь один и тот же вид.

И наконец, в некоторых работах, например, [2], для удовлетворительного описания диэлектрических свойств пород грунта вводится зависимость средней частоты релаксации от содержания водной фракции (значение этой частоты растет с ростом объемной влажности), что может означать, что значение этой частоты также зависит от давления окружающего грунта.

1. Wang J. R. An Empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content / J. R. Wang, T. J. Schmugge // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – 1980. – GE-18, N 4. – P. 288–295.
2. Wang J. R. The dielectric properties of soil-water mixtures at microwave frequencies / J. R. Wang // Radio Sci. – 1980. – 15, N 5. – P. 977–985.
3. Schwarz G. A theory of the low-frequency dielectric dispersion of colloidal particles in electrolyte solution / G. Schwarz // J. Phys. Chem. – 1962. – 66, N 12. – P. 2636–2642.
4. Wobschall D. A theory of a complex dielectric permittivity of soil containing water, the themidisperse model / D. Wobschall // IEEE Trans. Geosc. Electron. – 1977. – 15, N 1. – P. 29–58.
5. De Loor G. P. Dielectric properties of heterogeneous mixtures containing water / G. P. de Loor // J. Microwave Power. – 1968. – 3, N 2. – P. 67–73.
6. Microwave dielectric behavior of wet soil. Pt. 1. Empirical models and experimental observations from 1.4 to 18 GHz / M. T. Hallikainen, F. T. Ulaby, M. C. Dobson et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote sensing. – 1985. – GE-23, N 1. – P. 25–34.

7. Microwave dielectric behavior of wet soil. Pt. 2. Dielectric mixing Models / M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, M. A. El-Rayes // IEEE Trans. Geosci. Remote sensing. – 1985. – GE-23, N 1. – P. 35–46.
8. Hipp J. E. Soil Electromagnetic parameters as a function of frequency, soil density, and soil moisture / J. E. Hipp // Proc. IEEE. – 1974. – 62, iss. 1. – P. 98–103.
9. Poley J. Ph. Use of VHF Dielectric Measurements for Borehole Formations Analysis / J. Ph. Poley, J. J. Nooteboom, P. J. de Waal // The Log Analyst. – 1978. – 19, N 3. – P. 8–30.
10. Huchital G. Deep propagation tool. A new electromagnetic logging tool / G. Huchital // Presented at the Louisiana SPE Meeting and references therein. – 1982. – SPE Paper N 10988.
11. Chew W. C. A response of the deep propagation tool / W. C. Chew // Presented at the Louisiana SPE Conf. – 1982. – SPE Paper N 10989.
12. Sen Pabitra N. The Frequency Dependence Dielectric and Conductivity Response of Diamantoty Rocks / N. Sen Pabitra, W. C. Chew // J. of Microwave Power. – 1983. – 18, N 1. – P. 95–105.
13. Hoyer W. A. Dielectric constant of rocks as a petrophysical parameter / W. A. Hoyer, R. C. Rumble // SPWLA 17th Annual Logging Symp. – 1976. – Paper N 981.
14. Arulandan K. Low frequency dielectric dispersion of clay-water-electrolyte systems / K. Arulandan, J. K. Mitchell // Clay and Clay Minerals. – 1968. – 16, N 5. – P. 337–351.
15. Lockhart N. C. Electrical properties and surface characteristics and structure of clays. I. Swelling clays / N. C. Lockhart // J. Colloid and Interface Sci. – 1980. – 74, iss. 2. – P. 509–519.
16. Sen P. N. Dielectric and acoustic response of rocks / P. N. Sen // Lecture Notes in Physics. – N. Y.: Springer-Veriag, 1982. – Vol. 154. – P. 226.
17. Chew W. C. Dielectric enhancement due to electrochemical double layer: thin double layer approximation / W. C. Chew, P. N. Sen // J. Chem. Phys. – 1982. – 77, N 9. – P. 4483–4491.
18. Сугак В. Г. Особенности обработки сигналов при подповерхностном радиолокационном зондировании в диспергирующей среде / В. Г. Сугак // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2006. – 11, № 3. – С. 385–392.
19. Овчинкин О. А. Влияние электрических свойств грунта на характеристики сигнала при подповерхностном зондировании / О. А. Овчинкин, В. Г. Сугак // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2001. – 6, № 2–3. – С. 235–241.
20. Sugak V. G. Phase Spectrum of Signals in Ground Penetrating Radar Applications / V. G. Sugak, A. V. Sugak // IEEE Trans. On Geoscience & Remote Sensing. – 2010. – 48, iss. 4. – P. 1760–1767.
21. Петровский А. Д. Радиоволновые методы в подземной геофизике / А. Д. Петровский. – М.: Недра, 1971. – 224 с.
22. Лецинский Ю. И. Расчет электрических параметров песчано-глинистых грунтов на метровых–сантиметровых волнах / Ю. И. Лецинский, Н. В. Ульянычев // Изв. вузов. Радиофизика. – 1986. – 23, № 5. – С. 529–532.
23. Daniels David J. Ground Penetrating Radar / David J. Daniels. – 2nd ed. – London: The Institute of Electrical Engineers, 2004. – 723 p.
24. Сугак В. Г. Восстановление электрических характеристик грунта и глубины залегания объектов по результатам подповерхностного зондирования / В. Г. Сугак // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2002. – 7, № 3. – С. 491–497.
25. Оделевский В. И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем. Ч. 1. Матричные двухфазные системы с невтянутыми включениями / В. И. Оделевский // Журн. техн. физики. – 1951. – 21, вып. 6. – С. 667–677.

Рукопись поступила 15.07.2011.

V. G. Sugak., I. S. Bondarenko, A. V. Sugak

ABOUT DISCREPANCY BETWEEN DATA
OF SUBSURFACE SOUNDING
AND THEORETICAL MODELS
OF SOIL DIELECTRIC PROPERTIES

Results of comparison of theoretical models of dielectrical properties of soils with data obtained directly from subsurface radar sounding are considered in the paper. It is shown that the frequency dispersion of attenuation factor is less and frequency dispersion of radio wave propagation velocity is more than it is described in theoretical models. A possible physical mechanism of these phenomena is proposed to be concerned with influence of surrounding soil pressure on soil particles and soil pores.

Key words: dielectrical properties of soil, ground penetrating radar, frequency dispersion of soil dielectrical properties.

В. Г. Сугак, І. С. Бондаренко, О. В. Сугак

ПРО СУПЕРЕЧНІСТЬ ДАНИХ
ПІДПОВЕРХНЕВОГО ЗОНДУВАННЯ
ТЕОРЕТИЧНИМ МОДЕЛЯМ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОРІД ГРУНТУ

Наведено результати порівняння теоретичних моделей діелектричних властивостей порід ґрунтів з даними, що отримуються безпосередньо за результатами радіолокаційного підповерхневого зондування. Показано, що частотна дисперсія погонного затухання радіохвиль в типових породах ґрунту суттєво менша, а фазової швидкості поширення – суттєво більша за передбачувану в теоретичних моделях. Приведено міркування щодо фізичного механізму цих відмін, який, як передбачається, пов'язаний з впливом тиску оточуючого ґрунту на його частинки та поровий простір.

Ключові слова: діелектрична проникність, питома провідність, радіолокатор підповерхневого зондування, ґрунт.