

## Исследование анизотропии диэлектрической проницаемости грунта под давлением

© В. Г. Сугак, В. Н. Бормотов, В. А. Пархоменко, 2014

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,  
Харьков, Украина

Поступила 21 ноября 2013 г.

*Представлено членом редколлегии Э. Д. Кузьменко*

Наведено результати експериментальних вимірювань анізотропії діелектричної проникності зразків вологого піску у діапазоні частот 90—150 МГц, яка виникає в разі прикладення до них зовнішнього тиску. Вимірювання виконані на спеціальній установці за допомогою двох розроблених датчиків на основі відкритого кінця коаксіальної лінії, один з яких вимірює переважно діелектричну проникність уздовж вектора прикладеного тиску, а інший — у перпендикулярній до нього площині. В умовах прикладеного тиску коефіцієнт анізотропії вказаних зразків вологого піску досягав значення 1,6.

**Ключові слова:** комплексна діелектрична проникність порід ґрунту, анізотропія електричних характеристик, частотна дисперсія.

**Введение.** Исследованию диэлектрических свойств пород грунта традиционно уделяется значительное внимание в разных областях естественных наук. В частности, эти свойства определяют возможности правильной интерпретации результатов различных геофизических методов зондирования подповерхностной структуры грунта.

При геофизическом зондировании почвенных грунтов для решения задач инженерной геологии важное место занимают модели зависимостей их диэлектрических свойств от физических параметров, которыми описываются эти грунты. Без этих моделей также невозможно решать задачи по интерпретации результатов, возникающие при проведении практических инженерно-геологических изысканий с применением георадаров.

В литературе существуют большое количество работ, посвященных исследованию физических свойств грунтов, в том числе их диэлектрических характеристик, а также методам измерения частотных зависимостей этих характеристик в разных диапазонах частот. При этом необходимо отметить, что большинство таких работ относится к диапазону частот выше 1 ГГц [Hallikainen et al., 1985 a; Wang, 1980].

В данной статье будет рассматриваться диапазон частот до 1 ГГц, так как именно он используется, в основном, для подповерхностного зондирования верхних слоев грунта в зоне аэрации, т. е. на глубинах до нескольких десятков метров. Необходимость исследования частотных свойств комплексной диэлектрической проницаемости пород грунта в этом диапазоне диктуется также некоторыми экспериментальными данными, показывающими, что существующие модели диэлектрических характеристик основных пород грунта в этом диапазоне не отвечают реальности и не дают возможности точной интерпретации результатов георадарного зондирования. В частности, в работе [Сугак и др., 2012] показано, что частотную дисперсию комплексной диэлектрической проницаемости основных пород грунта, определяемой широко используемой моделью [Hallikainen et al., 1985 б], необходимо корректировать для более правильной интерпретации данных георадарного зондирования. Это указывает на то, что в естественных условиях на комплексную диэлектрическую проницаемость могут оказывать влияние дополнительные факторы, которые не учитывались при разработке указанных моделей. Одним из таких факторов может

быть давление на частички грунта, оказываемое со стороны расположенных выше слоев грунта, которое возрастает с глубиной.

Другим важным обстоятельством, которое надо учитывать при указанной интерпретации результатов, является наличие анизотропии комплексной диэлектрической проницаемости. О такой анизотропии вскользь упоминается в ряде работ. Например, в работе [Манштейн, 2002] говорится о том, что основные электромагнитные свойства горных пород, которыми являются:  $\rho$  — удельное поверхностное сопротивление,  $\eta$  — вызванная поляризуемость,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость,  $\mu$  — магнитная проницаемость, характеризуются микро- или макроанизотропией, хотя часто этой анизотропией пренебрегают. В работе указывается, что глубина залегания, степень метаморфизма, структура и текстура породы влияют на сопротивление породы, изменяя коэффициент микроанизотропии:

$$\lambda = \sqrt{\rho_n / \rho_l}, \quad (1)$$

где  $\rho_n$ ,  $\rho_l$  — сопротивление породы вкрест и вдоль слоистости соответственно. Чаще всего  $\lambda$  изменяется от 1 до 1,5, достигая 2—3 у сильно рассланцованных пород. Общие закономерности изменения удельного электрического сопротивления рыхлых осадочных пород определяются влиянием литологии (глинистость), влажности (водонасыщенность) и минерализации подземных вод.

В работах [Everette et al., 1980; Ладнин, 2010] отмечается зависимость диэлектрической проницаемости от размера зерен пород: тонкодисперсные водонасыщенные породы имеют большие значения  $\epsilon$ , в особенности на низких частотах, и указывается на то, что для тонкослоистых разрезов и горных пород с преобладающей ориентацией минералов низких сингоний характерна анизотропия; вдоль слоистости диэлектрическая проницаемость всегда выше, причем у водонасыщенных пород это различие выражено сильнее, чем у сухих.

На наличие анизотропии диэлектрических характеристик пород грунта указывают также некоторые данные георадарного зондирования, полученные при использовании зондирующего сигнала со ступенчатым изменением его несущей частоты [Сугак и др., 2012]. В частности, одновременное использование изображений амплитуд отраженных сигналов и их фазовой структуры показывает, что в некоторых случаях на них наблюдается небольшое смещение образа какой-либо неоднородности

подповерхностной структуры грунта в горизонтальной плоскости. Так как амплитудное изображение связано с направлением распространения вектора Пойтинга в среде, а фазовое изображение — с направлением волнового вектора, то при анизотропии диэлектрической проницаемости эти векторы будут смещены на некоторый угол [Ландау, Лифшиц, 1962], что и наблюдалось в некоторых случаях при георадарном зондировании пород грунта.

Если о наличии анизотропии комплексной диэлектрической проницаемости пород грунта свидетельствует ряд работ, то информация о методах измерения такой анизотропии в реальной ситуации, когда породы грунта находятся под давлением со стороны верхних слоев, практически отсутствует.

Существующие контактные методы измерения диэлектрической проницаемости пород грунта основаны на использовании различных датчиков, среди которых наиболее распространенным является датчик на основе открытого конца коаксиального кабеля, у которого внутренний проводник слегка выступает вперед. Однако этими методами практически невозможно измерять анизотропию комплексной проницаемости на значительных глубинах, так как трудно поместить туда датчики без вскрытия пород, а при вскрытии теряется основной фактор анизотропии — давление верхних пород грунта на нижние. Поэтому были предприняты измерения диэлектрической проницаемости образцов грунта в лабораторных условиях на специальной измерительной установке при создании искусственного внешнего давления.

**Методика измерения электрических характеристик грунта в заданной полосе частот под давлением.** Проблемы, связанные с поиском приемлемых методов измерения диэлектрических свойств вещества, были решены частично в 50—80-е годы прошлого столетия благодаря развитию концепции, основанной на использовании специальной теоремы, описывающей свойства антенны при погружении в реальные среды [Richmond, 1961; Tai, 1961; Deschamps, 1962]. Эта теорема связывает импеданс антенны в свободном пространстве с импедансом при ее погружении в вещество, обладающее диэлектрическими и магнитными свойствами, отличными от свободного пространства.

Рассмотрим короткую монополюсную антенну (отрезок коаксиальной линии с практически не выступающим центральным проводником), которую в дальнейшем будем называть коаксиальным датчиком [Everette et al., 1980].

Применительно к коаксиальному датчику можно записать следующее выражение для его импеданса в свободном пространстве:

$$Z(\omega, \epsilon_0) = A\omega^2 + \frac{1}{j\omega C}, \quad (2)$$

где  $A$  и  $C$  — константы, определяемые физическими размерами антенны [Everette et al., 1980],  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота. При погружении датчика в диэлектрическую среду это выражение преобразуется к виду

$$Z(\omega, \epsilon^*) = A\omega^2 \sqrt{K'(1 - j \operatorname{tg} \delta)} + \frac{1}{j\omega C(K'(1 - j \operatorname{tg} \delta))}, \quad (3)$$

где  $\operatorname{tg} \delta$  — тангенс диэлектрических потерь,  $K' = \epsilon' / \epsilon$  — относительная диэлектрическая постоянная.

Выражение (3) является основным при измерениях электрических характеристик среды с помощью коаксиального датчика [Everette et al., 1980].

С учетом приведенных выражений с обозначением  $\epsilon^* = \epsilon_0 (K' - jK'') = K' \epsilon_0 (1 - \operatorname{tg} \delta)$  в этой же работе была получена следующая система уравнений, связывающая параметры  $K'$  и  $\operatorname{tg} \delta$ , характеризующие исследуемые электрические свойства среды, с вещественной и мнимой частями волнового сопротивления антенны  $Z = R + jX$ :

$$R = \frac{\sin 2\delta}{2K'\omega C} + A \sqrt{K'} \omega^2 \sqrt{\frac{\sec \delta + 1}{2}},$$

$$X = \frac{\cos^2 \delta}{K'\omega C} + A \sqrt{K'} \omega^2 \sqrt{\frac{\sec \delta - 1}{2}}, \quad (4)$$

где  $K'' = \epsilon'' / \epsilon$  — относительный коэффициент потерь,  $\operatorname{tg} \delta = \sigma / \omega \epsilon'$ ,  $\sigma$  — удельная проводимость.

Рассмотрим кратко методику измерения электрических характеристик образцов грунта с использованием описанного выше коаксиального датчика в некотором диапазоне частот. Для этого использовалась установка, блок-схема которой представлена на рис. 1.

Для измерения анизотропии диэлектрических свойств пород грунта, обусловленных давлением со стороны вышележащих слоев, была разработана лабораторная установка (рис. 2), в состав которой входил металлический цилиндр, одна из торцевых сторон которого была наглухо закрыта металлическим диском, а во второй такой же диск мог свободно перемещаться вдоль оси цилиндра. К этому диску подсоединялся упор домкрата для создания необходимого давления на образец породы, помещенного внутрь цилиндра. С помощью рычага длиной 510 мм и усилия на рычаг 10 кг на диск прикладывалось давление примерно 4 670 кг (пересчитанное с учетом угла резьбы домкрата). Результирующее удельное давление при этом составляло 30 кг/см<sup>2</sup>.

К боковым сторонам примерно посередине цилиндра с противоположных сторон были раз-

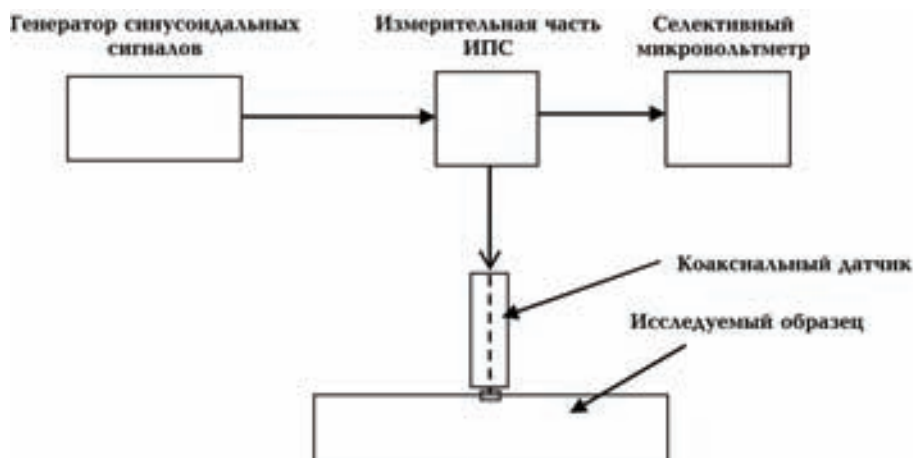


Рис. 1 Блок-схема установки для измерения электрических характеристик образцов грунта.

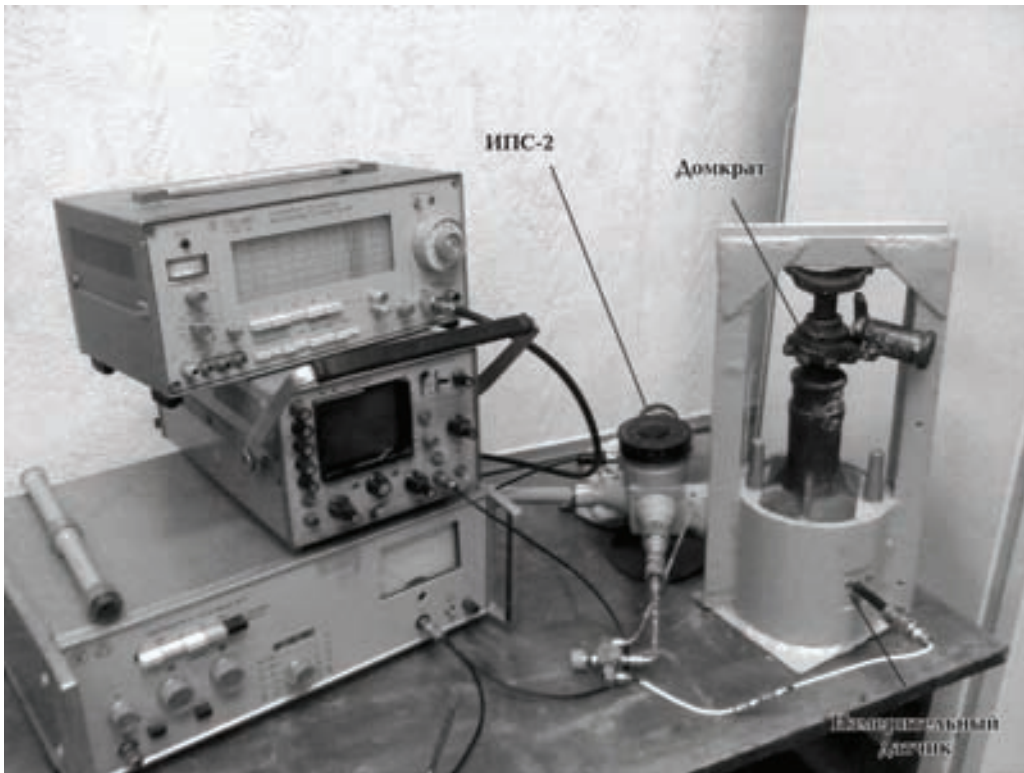


Рис. 2. Фотография измерительного стенда.

мещены коаксиальные датчики для измерения комплексной диэлектрической проницаемости.

В качестве датчиков были использованы несколько модернизированных датчиков на основе открытого конца коаксиального кабеля. Центральный провод выступал на 2 см над концом экрана, а к экрану припаивался латунный диск диаметром порядка 4 см, в котором параллельно центральному проводнику припаивался проводник с таким же диаметром провода. Такая конструкция датчика позволила увеличить емкость между центральным проводником и экраном, что существенно увеличило чувствительность датчика при измерении комплексной диэлектрической проницаемости пород грунта. При этом параллельное расположение проводников позволило увеличить чувствительность датчика при измерении анизотропии диэлектрической проницаемости образцов грунта. Первый датчик располагался в цилиндре так, чтобы плоскость, проходящая через указанные два проводника, была параллельна дну цилиндра, а второй располагался так, чтобы эта плоскость была перпендикулярна этому дну (рис. 3). При этом первый датчик измерял преимущественно комплексную диэлектрическую проницаемость в го-

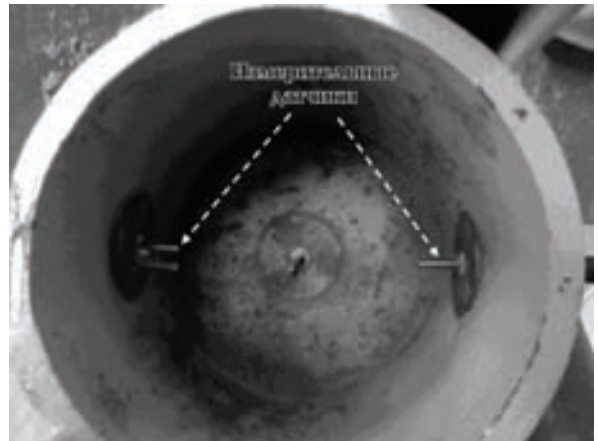


Рис. 3. Фотография внутренней части цилиндра с датчиками.

ризонтальной плоскости, т. е. перпендикулярно создаваемому давлению, а второй — в вертикальной плоскости, т. е. вдоль вектора создаваемого давления.

К сожалению, указанная конструкция датчика при увеличении чувствительности к диэлектрической проницаемости вещества образцов грунта привела к повышенному значению

сопротивления излучения, что увеличило погрешность измерения тангенса диэлектрических потерь исследуемых пород грунта.

Методика измерения состояла в следующем. Датчики с помощью коаксиального кабеля подключались к входу измерителя полных сопротивлений ИПС-2. Измерялись коэффициент стоячей волны и фаза коэффициента отражения в полосе частот 90—140 МГц. Затем вычислялись вещественная и мнимая части полного сопротивления на входе измерителя полных сопротивлений (ИПС) через коэффициент отражения и его фазу по известным формулам:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(Z(\omega)) &= \rho \frac{1 - |\Gamma(\omega)|^2}{1 + |\Gamma(\omega)|^2 - 2\Gamma(\omega) \cos(\varphi_\Gamma)}, \\ \operatorname{Im}(Z(\omega)) &= \rho \frac{2\Gamma(\omega) \sin(\varphi_\Gamma)}{1 + |\Gamma(\omega)|^2 - 2\Gamma(\omega) \cos(\varphi_\Gamma)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\rho$  — волновое сопротивление отрезка кабеля,  $\Gamma$  — комплексный коэффициент отражения,  $\varphi_\Gamma$  — фаза коэффициента отражения.

Затем измеренное полное сопротивление пересчитывались ко входу датчика с учетом длины кабеля по формуле

$$Z_d(\omega) = \frac{Z(\omega) - j\rho \operatorname{tg}(\beta(\omega)l_c)}{1 - j \frac{Z(\omega)}{\rho} \operatorname{tg}(\beta(\omega)l_c)}. \quad (6)$$

Вначале измерялось комплексное входное сопротивление датчиков в заданном диапазоне частот, находящихся в воздушном пространстве. Для этого случая формулы (5) приобрели следующий вид:

$$\operatorname{Re}(Z_d(\omega)) = \frac{\sin(2\delta)}{2\omega C} + A\omega^2 \sqrt{\frac{\sec \delta + 1}{2}}, \quad (7a)$$

$$\operatorname{Im}(Z_d(\omega)) = \frac{\cos^2 \delta}{2\omega C} + A\omega^2 \sqrt{\frac{\sec \delta - 1}{2}}. \quad (7б)$$

Так как в данном случае параметры датчиков  $C$  и  $A$  являются константами, из уравнений (7) они определяются однозначно. Анализ выражений (7) показал, что в нашем случае в первой части второго выражения (7б) можно пре-

небречь вторым членом, содержащим  $A$ , причем отбрасываемый член на несколько порядков меньше оставшегося. Учитывая то обстоятельство, что величина  $\delta$  для воздуха очень мала, из второго уравнения однозначно определяется емкость датчика  $C$ . После этого, подставляя полученное выражение для емкости в первое уравнение, с учетом малости величины  $\delta$  можно итерациями определить значение  $A$ .

Таким образом, для случая, когда датчики находятся в воздушном пространстве, можно определить основные параметры датчиков: емкость и параметр  $A$ , характеризующий сопротивление излучения.

В реальности оказалось, что в силу недостаточной точности измерения коэффициента стоячей волны и фазы в измерителе полных сопротивлений наблюдалась слабая зависимость указанных величин от частоты. Поэтому для дальнейших расчетов в качестве емкости  $C$  и параметра  $A$  выбирались их средние значения в заданном диапазоне частот, а именно  $C = 27,5$  пФ,  $A = 8,3 \cdot 10^{-18}$ .

В результате наблюдалась слабая зависимость диэлектрической проницаемости воздуха от частоты, как это показано на рис. 4 при значении, равном 1.

Одной из причин слабой зависимости от частоты диэлектрической проницаемости воздуха, измеренной датчиками, может быть также то обстоятельство, что они оба помещены в металлический цилиндр с практически замкнуты-

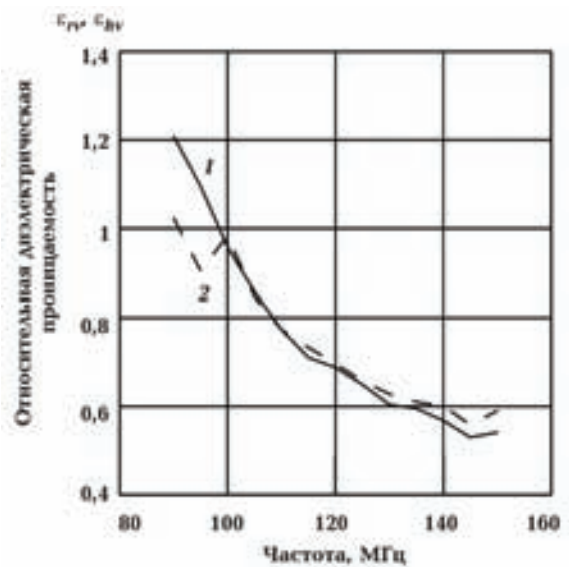


Рис. 4. Диэлектрическая проницаемость воздуха, измеренная двумя датчиками.

ми торцами, который представляет собой резонатор. Хотя его резонансная частота лежит существенно выше используемого диапазона частот, все же его частотная характеристика влияет на результаты измерений.

Естественно, измеренный коэффициент анизотропии для воздуха в указанном диапазоне частот практически равен единице (колеблется в окрестности 0,9—1,1).

При измерении диэлектрических характеристик образцов песка, особенно влажного песка, ситуация несколько сложнее. Первый и второй члены правой части выражения (7а) становятся соизмеримыми, что значительно осложняет вычисления тангенса диэлектрических потерь образцов грунта. Практически же не удается даже итерационными приближениями получить достаточную точность измерения этой величины.

Поэтому мы сконцентрировались на возможности измерения только степени анизотропии диэлектрической проницаемости образцов влажного песка, возникающей при прикладывании давления на образец грунта.

Коэффициент анизотропии определялся по зависимости отношения диэлектрической проницаемости датчиков, измеряющих преимущественно вертикальную и горизонтальную компоненты этой проницаемости. Так как оба датчика были идентичными и располагались на одинаковой высоте от дна металлического цилиндра, предполагается, что они измеряли с одинаковой точностью диэлектрическую проницаемость образцов грунта в заданном диапазоне частот. И только наличие анизотропии за счет создаваемого давления могло приводить к отличию величин, измеренных датчиком для вертикальной составляющей диэлектрической проницаемости и датчиком для горизонтальной составляющей. Для исключения фактора случайности была проведена серия из двух измерений, выполненных в разное время и с разной влажностью образцов песка. Во второй серии измерений диэлектрические свойства образца песка измерялись до прикладывания внешнего давления, после его прикладывания и затем после снятия давления для исключения влияния остаточных эффектов, возникающих вследствие сдавливания грунта.

**Результаты измерения коэффициента анизотропии образцов песка под давлением.** Рассмотрим основные результаты первой серии измерений. На данном этапе исследованной объемная влажность песка не контролировалась. В сухой песок добавлялась вода так,

чтобы образец был слегка влажным. На 1,5 дм<sup>3</sup> песка было добавлено примерно 0,2 дм<sup>3</sup> воды. На рис. 5 приведены зависимости диэлектрической проницаемости от частоты влажного песка под давлением, измеренные вертикальным (сплошная кривая) и горизонтальным (пунктирная кривая) датчиками. На частотах выше 120 МГц наблюдается подъем значений диэлектрической проницаемости вертикального датчика по сравнению с горизонтальным датчиком. Интересно отметить, что меньшая частотная дисперсия диэлектрической проницаемости для вертикального датчика соответствует выводам работы [Сугак и др., 2012], где приводится сравнение экспериментальных данных о частотной дисперсии фазовой скорости распространения радиоволн в подповерхностном пространстве с расчетными данными, полученными на основе широко используемых моделей зависимости диэлектрической проницаемости типовых грунтов от их физических параметров.

На рис. 6 приведены зависимости диэлектрической проницаемости от частоты влажного песка без давления. Видно, что обе кривые практически совпадают.

На рис. 7 приведены зависимости диэлектрической проницаемости от частоты для сухого песка без давления и под давлением соответственно.

И, наконец, на рис. 8 показаны зависимости от частоты коэффициента анизотропии диэлектрической проницаемости образца песка,

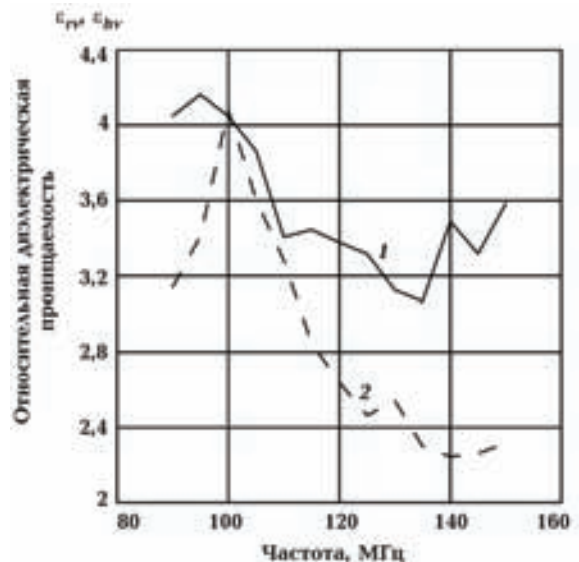


Рис. 5. Диэлектрическая проницаемость образца влажного песка под давлением: 1 — вертикальный датчик, 2 — горизонтальный датчик.

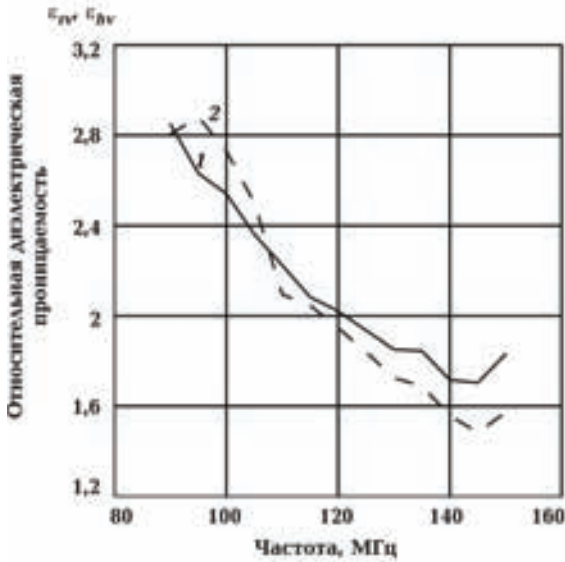


Рис. 6. Диэлектрическая проницаемость образца влажного песка без давления: 1 — вертикальный датчик, 2 — горизонтальный датчик.

вычисленные по приведенным выше результатам. Видно, что коэффициент анизотропии влажного песка под давлением достигает значения 1,6 на верхних частотах (140—150 МГц), опускаясь до значений 1—1,3 на частотах 90—120 МГц. Для сравнения на этом же рисунке показаны аналогичные графики для влажного песка без давления и для сухого песка под давлением и без него. Видно, что коэффициент ани-

зотропии диэлектрической проницаемости сухого песка под тем же давлением во всем диапазоне частот слегка отклоняется от единицы, что говорит о том, что для сухого песка давление в указанных пределах не приводит к сильно выраженной анизотропии диэлектрической проницаемости.

Во второй серии измерений (после небольшого ремонта датчика, измеряющего вертикальную составляющую диэлектрической проницаемости) в такой же объем песка было добавлено около 0,25 дм<sup>3</sup> воды. Результирующее удельное давление на образец песка было несколько меньше, чем 30 кг/см<sup>2</sup>, соответствующее первой серии измерений. Результаты измерений приведены на рис. 9. На рис. 9, а представлены измеренные зависимости диэлектрической проницаемости влажного образца песка до прикладывания (кривые 1, 2) и после прикладывания давления (кривые 3, 4) к нему внешнего давления, а на рис. 9, б — после снятия внешнего давления примерно через 15 мин. При этом кривые 1, 3, 5 относятся к датчику, измеряющему вертикальную компоненту диэлектрической проницаемости, а кривые 2, 4, 6 — к датчику, измеряющему горизонтальную компоненту диэлектрической проницаемости образца влажного песка.

Видно, что после приложения давления диэлектрическая проницаемость образца песка несколько увеличилась от 2—3 в измеряемом ди-

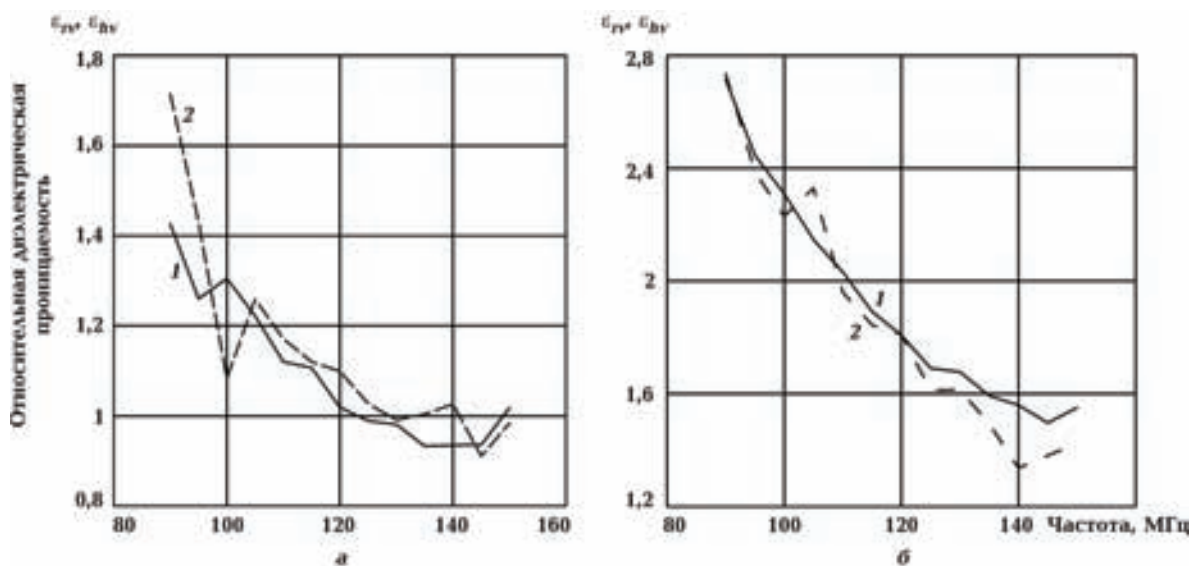


Рис. 7. Диэлектрическая проницаемость сухого песка без (а) и под (б) давлением: 1 — вертикальный датчик, 2 — горизонтальный датчик.

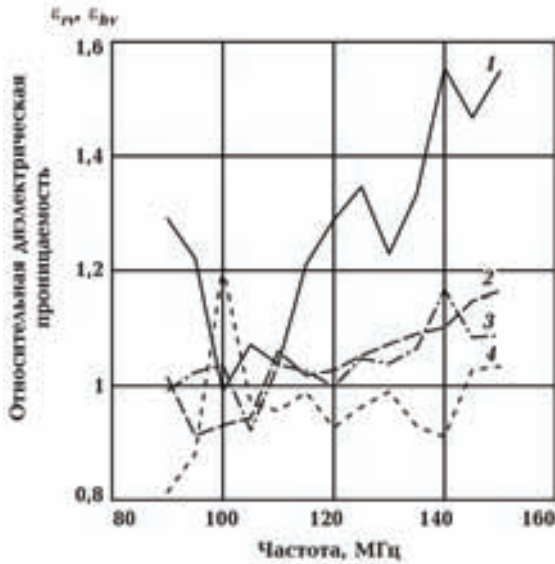


Рис. 8. Зависимости от частоты коэффициента анизотропии диэлектрической проницаемости песка: 1 и 3 — влажный и сухой песок под давлением; 2 и 4 — влажный и сухой песок без давления.

апазоне частот до 3,5—5,1, при этом появилась анизотропия диэлектрической проницаемости, хотя и несколько ниже, чем в первой серии измерений. Если учесть, что в исходном состоянии (без давления) кривая зависимости диэлектрической проницаемости образца песка от частоты для вертикального датчика (кривая 1 на

рис. 9) лежит в высокочастотной области ниже аналогичной кривой для горизонтального датчика, то коэффициент анизотропии в этой области частот будет соизмерим с результатами первой серии. Сразу после снятия давления диэлектрическая проницаемость несколько уменьшилась (примерно до 3—4,6 в измеряемом диапазоне частот), а эффект анизотропии, как можно видеть из рисунка, практически исчез.

**Выводы.** 1. В результате экспериментальных исследований выяснилось, что давление на образцы влажного песка приводит к появлению анизотропии его диэлектрической проницаемости. Причем вертикальная составляющая (в направлении оси создаваемого давления) диэлектрической проницаемости образца грунта становится больше горизонтальной составляющей (перпендикулярной к оси создаваемого давления).

2. Эффект появления анизотропии диэлектрической проницаемости под давлением проявляется несколько больше в диапазоне примерно 120—150 МГц, где коэффициент анизотропии достигал значения 1,6, хотя это может быть обусловлено меньшей точностью измерения диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 90—120 МГц.

3. В сухом песке недостаточная точность измерения диэлектрической проницаемости не позволила сделать надежный вывод о появлении ее анизотропии в указанном диапазоне частот.

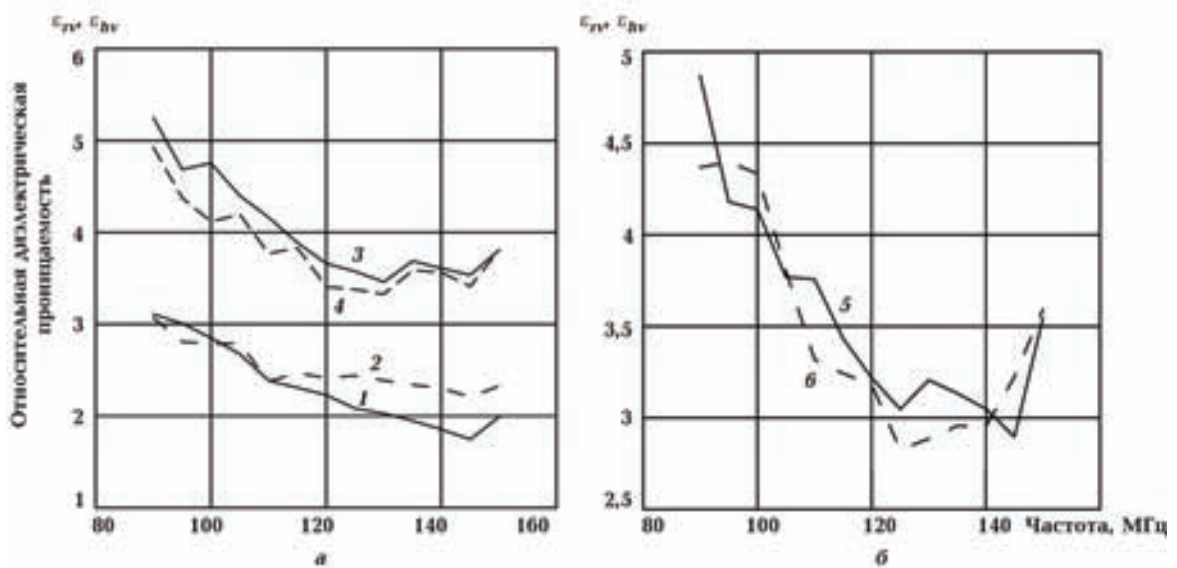


Рис. 9. Диэлектрическая проницаемость влажного песка без давления (кривые 1, 2) и после приложения давления (кривые 3, 4) (а), а также после снятия давления (кривые 5 и 6) (б).



## Список литературы

- Ладынин А. В. Физические свойства горных пород. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2010. 101 с.
- Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. Москва: Наука, 1982. 620 с.
- Маништейн А. К. Малоглубинная геофизика. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2002. 136 с.
- Сугак В. Г., Бондаренко И. С., Сугак А. В. О противоречии данных подповерхностного зондирования теоретическим моделям диэлектрических характеристик пород грунта. *Радиофизика и электроника*. 2012. Т. 3. № 1. С. 19—29.
- Deschamps G. A., 1962. Impedance of an antenna in a conducting medium. *IRE Trans. On Antennas and Propagation* AP-10, 648—650.
- Everette C. B., Fred L. C., Seals J., 1980. In Vivo Probe Measurement Technique for Determining Dielectric Properties at VHF Through Microwave Frequencies. *IEEE Trans. On Microwave Theory and Technoques* MTT-28 (4), April, 414—427.
- Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Dobson M. C., El-Ra-yes M. A., Wu L., 1985 а. Microwave dielectric behavior of wet soil, P. 1: Empirical models and experimental observations from 1,4 to 18 GHz *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing* GE-23 (1), January, 123—131.
- Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Dobson M. C., El-Ra-yes M. A., Wu L., 1985 б. Microwave dielectric behavior of wet soil, P. 2: Dielectric mixing Models. *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing* GE-23 (1), January, 35—46.
- Richmond J. H., 1961. A reaction theorem and its application to antenna impedance calculation. *IRE Trans. Antennas Propagat.*, Nov., 515—520.
- Tai C. T., 1961. Characteristics of Linear Antenna Elements in Antenna Engineering Handbook (Ed. H. Jasic). New York: McGraw-Hill, ch. 3, 2—8.
- Wang J. R., 1980. The dielectric properties of soil-water mixtures at microwave frequencies. *Radio Sci.* 15, P. 977.

## Studies of anisotropy of dielectric permeability of soil rocks under pressure

© V. G. Sugak, V. N. Bormotov, V. A. Parkhomenko, 2014

This paper presents the results of experimental measurements of anisotropy of dielectric permeability of wet sand samples appearing as a result of applied external pressure in the frequency range 90—150 MHz. The measurements were made on special measuring stand with use of two developed sensors, one of which measures dielectric permeability along the vector of pressure and another one — in perpendicular direction. As a result, the anisotropy coefficient of dielectric permeability of the wet sand samples reached the value of 1,6.

**Key words:** complex dielectric permeability of soil rocks, anisotropy of electrical characteristics, frequency dispersion.

## References

- Ladynin A. V., 2010. Physical properties of rocks. Novosibirsk: Publ. House of the NSU, 101 (in Russian).
- Landau L. D., Lifshitz E. M., 1982. Electrodynamics of continuous media. Moscow: Nauka, 620 p. (in Russian).
- Manstein A. K., 2002. Shallow Geophysics. Novosibirsk: Publ. House of the NSU, 136 p. (in Russian).
- Sugak V. G. S., Bondarenko I. S., Sugak A. V., 2012. About contradiction subsurface sensing data to theoretical models of the dielectric characteris-

- tics of rocks soil. *Radiofizika i jelektronika* 3 (1), 19—29 (in Russian).
- Deschamps G.A.*, 1962. Impedance of an antenna in a conducting medium. *IRE Trans. On Antennas and Propagation* AP-10, 648—650.
- Everette C.B., Fred L.C., Seals J.*, 1980. In Vivo Probe Measurement Technique for Determining Dielectric Properties at VHF Through Microwave Frequencies. *IEEE Trans. On Microwave Theory and Technoques* MTT-28 (4), April, 414—427.
- Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Dobson M. C., El-Ra-yes M.A., Wu L.*, 1985 a. Microwave dielectric behavior of wet soil, P. 1: Empirical models and experimental observations from 1,4 to 18 GHz *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing* GE-23 (1), January, 123—131.
- Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Dobson M. C., El-Ra-yes M.A., Wu L.*, 1985 б. Microwave dielectric behavior of wet soil, P. 2: Dielectric mixing Models. *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing* GE-23 (1), January, 35—46.
- Richmond J.H.*, 1961. A reaction theorem and its application to antenna impedance calculation. *IRE Trans. Antennas Propagat.*, Nov., 515—520.
- Tai C.T.*, 1961. Characteristics of Linear Antenna Elements in Antenna Engineering Handbook (Ed. H. Jasic). New York: McGraw-Hill, ch. 3, 2—8.
- Wang J.R.*, 1980. The dielectric properties of soil-water mixtures at microwave frequencies. *Radio Sci.* 15, P. 977.