

УДК 550.3

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-5-158-168

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛЕВОГО И ЛАБОРАТОРНОГО МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НА ПРИМЕРЕ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Мария Александровна Тарасова¹✉, Светлана Сергеевна Бричёва²,
Михаил Львович Владов³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; tarasovama@my.msu.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт Географии РАН, Москва, Россия; svebrich@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vladov_ml@mail.ru

Аннотация. Сведения о диэлектрической проницаемости отложений могут быть полезны при интерпретации георадарных данных, в частности, в условиях песчано-глинистого разреза. Среди методов измерения электромагнитных параметров большее предпочтение отдается методу временной рефлектометрии в связи с возможностью измерений *in situ* при сохранении естественной плотности и влажности отложений. Однако, для его применения необходим открытый грунт, например, шурф или стенка карьера, которые на месте проведения геолого-геофизических работ редко встречаются. Намного чаще различными специалистами бурятся скважины и отбираются образцы. В таких случаях для измерения диэлектрической проницаемости применяется лабораторный метод с использованием коаксиальной ячейки. Замена одного метода на другой приводит к расхождениям в измеренных значениях, в первую очередь за счет изменения состояния образца по сравнению с естественным состоянием грунта. Поэтому в данной работе на примере искусственных и природных песчано-глинистых отложений анализируются величины этих расхождений в зависимости от гранулометрического состава и влажности.

Ключевые слова: метод временной рефлектометрии, TDR, коаксиальная ячейка, электромагнитные свойства, объемная, весовая влажность, физический эксперимент, георадар

Для цитирования: Тарасова М.А., Бричева С.С., Владов М.Л. Методические особенности полевого и лабораторного методов измерения диэлектрической проницаемости на примере песчано-глинистых отложений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 5. С. 158–168.

METHODICAL FEATURES OF FIELD AND LABORATORY DIELECTRIC PERMITTIVITY MEASURING TECHNIQUES FOR SAND-CLAY GROUND

Mariya A. Tarasova¹✉, Svetlana S. Bricheva², Mikhail L. Vladov³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; tarasovama@my.msu.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University; Institute of Geography of the RAS, Moscow, Russia; svebrich@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vladov_ml@mail.ru

Abstract. Information about the dielectric permittivity of deposits can be useful in the interpretation of GPR data, particularly in the context of sandy-clay ground. Among the methods for measuring electromagnetic parameters, greater preference is given to the Time Domain Reflectometry (TDR) method due to its ability to perform *in situ* measurements while preserving the natural density and moisture content of the deposits. However, its application requires open ground, such as a trench or a quarry wall, which are rarely found at the sites of geological and geophysical work. Much more frequently, various specialists drill wells and collect samples. In such cases, instead of the TDR method for measuring dielectric permittivity, a laboratory method using a coaxial cell is employed. The substitution of one method for another leads to discrepancies in the measured values, primarily due to changes in the sample's condition compared to the natural state of the soil. Therefore, this study analyzes the magnitude of these discrepancies in artificial and natural sandy-clay deposits depending on the grain size distribution and moisture content.

Keywords: Time Domain Reflectometry, TDR, coaxial cell, electromagnetic properties, volumetric moisture content, gravimetric moisture content, physical experiment, GPR

For citation: Tarasova M.A., Bricheva S.S., Vladov M.L. Methodical features of field and laboratory dielectric permittivity measuring techniques for sand-clay ground. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 5: 158–168. (In Russ.).

Введение. При интерпретации данных георадиолокации на этапе привязки осей синфазности глубинного разреза к границам, выделенным специалистами на литологической колонке, инженерно-геологическом разрезе или в обнажении могут возникать трудности. Причина состоит в том, что границы изменения электрических свойств грунтов могут не совпадать, например, с наблюдаемой литологической последовательностью [Van Dam, et al., 2002]. Как следствие, на радарограмме количество осей синфазности будет отличаться от числа выделенных литологических границ, или они будут смещены по глубине. Установление причин изменения электромагнитных свойств на границах, не совпадающих с литологическими, позволит объяснить природу наблюдаемых на радарограмме отражений и уточнить геологическую интерпретацию. Для этого необходимо знать электромагнитные свойства отложений в пределах изучаемого георадаром разреза и их связь с физико-механическими параметрами. К основным электромагнитным свойствам отложений, определяющим отражательную способность границ в методе георадиолокации, относятся диэлектрическая проницаемость и проводимость [Владов, Судакова, 2017]. Диэлектрическая проницаемость (ДП) отложений контролируется соотношением в их поровом пространстве воды и воздуха, так как ДП минерального скелета изменяется в узких пределах от 2,5 до 7 [Schon, 2011], воды — около 80, воздуха — близка к 1. Поэтому существует множество зарубежных и отечественных исследований, посвященных изучению связей между ДП и параметрами, напрямую или косвенно указывающими на содержание воды и воздуха в порах. Например, в работе [Rust, 1999] получена связь ДП с пористостью вулканических пород; в [Botha, et al., 2003] — с размерами песчаных частиц, в [Owenier, et al., 2016] — с гранулометрическим составом песчано-глинистых пород. Распространены исследования, направленные на изучение связи ДП и влажности для различных типов пород, для случая песчано-глинистых отложений они рассмотрены в работе [Knoll, 1996]. Таким образом, изменение ДП в разрезе может происходить вследствие изменения соотношения вода-воздух в отложениях, количественно выражающемся в физико-механических параметрах: влажности, пористости, плотности, гранулометрическом составе. Проблема состоит в том, что границы, на которых происходит изменение физико-механических параметров и, как следствие ДП, не всегда сопровождаются изменением литологии, что и приводит к неточностям интерпретации. Примерами таких границ являются уровень грунтовых вод (УГВ) в песчаном слое [Старовойтов, 2023], границы с вариацией размеров частиц в песчаных дюнах [Botha, et al., 2003] и др. Отсутствие учета влияния проводимости изучаемой среды, общепринятое в георадиолокации предположение о том, что среда является диэлектриком, также ведет к проблематич-

ности интерпретации, например, границ в водной толще, в частности, галоклина [Крылов и др., 2014].

В рамках настоящей работы для измерений электромагнитных свойств отложений использован коаксиальный метод в качестве лабораторного, и метод рефлектометрии во временной области (time-domain reflectometry — TDR) в качестве полевого. Коаксиальный метод работает в частной области. Преимущества этого метода основаны на небольшом количестве исследуемого образца, необходимом для измерений, возможности измерить электрофизические параметры материала в широком диапазоне частот от первых Герц до СВЧ [Касимова, Верзунов, 2022; Shenhui, et al., 2003]. Этот лабораторный метод удобно применять для изучения электромагнитных свойств образцов, отобранных из скважин, когда нет возможности прямого измерения в обнажении. Недостатком метода является требование механической подготовки образца для лучшего контакта с коаксиальной линией, из-за чего не сохраняется естественная плотность, пористость, объемная влажность. Метод рефлектометрии во временной области нашел применение в решении задач почвоведения и геологии как косвенный метод определения объемной влажности почв и горных пород [Davis, 1975; Topp, et al., 1980]. Рабочий диапазон частот как правило составляет от 20 кГц до 1,5 ГГц [Heimovaara, 1994]. Преимущества метода заключаются в возможности измерения ДП почв и грунтов в естественном состоянии (*in situ*), в стенке шурфа, карьера или другого обнажения. Недостатком метода можно считать неопределенность в соотношении измеренного значения ДП с конкретной частотой, так как метод работает во временной области. Эта частота называется эффективной, и в работе [Kelleners, 2005] показано, что для песчано-глинистого образца со средней влажностью она составляет около 800 МГц.

Два вышеописанных метода измерений электромагнитных свойств различаются по физическому принципу работы и частотному диапазону, и на данный момент проведено недостаточно исследований, направленных на сравнение результатов этих методов. Для цели настоящей работы было важно оценить сходимость результатов измерений, чтобы понимать, какие расхождения в ДП могут возникнуть при замене одного метода на другой. Как отмечалось выше, для лабораторного метода необходима обработка образца, после которой он частично теряет естественные свойства и поэтому его ДП может быть непригодна для точной интерпретации. В лабораторном методе измерения ДП проводятся на отдельных частотах от кГц до ГГц. Из-за наличия «георадарного плато», диапазона частот от первых МГц до первых ГГц, в котором величина ДП не изменяется, не имеет значения на какой частоте в данном диапазоне будет проводится измерение [Владов, Судакова, 2017]. Однако, в последнее время в связи с развитием технологий широкополосных измерений возникают вопросы

к степени выдержанности «георадарного плато» и его частотных границ. Это иногда приводит к неопределенности выбора значения и к неточностям при осреднении ДП в диапазоне частот от первых МГц до первых ГГц. Помимо этого, в научной литературе недостаточно информации о связи ДП, измеренной полевым и лабораторным методом, с разными показателями влажности: объемной и весовой. Например, зарекомендовавшая себя на практике эмпирическая формула Торппа [Torppa, et al., 1980] связывает ДП и объемную влажность, а о зависимости ДП, определенной полевым методом, от весовой влажности, которая по сравнению с объемной определяется намного чаще, известно мало. Аналогичная проблема с изученностью имеется для зависимости ДП, полученной лабораторным путем, от объемной влажности.

Таким образом, цель исследования — выявить ограничения и особенности лабораторного и полевого методов измерения диэлектрической проницаемости на примере песчано-глинистых отложений искусственного и природного происхождения с различной весовой и объемной влажностью.

В задачи исследования входят:

- оценка сходимости результатов измерений ДП лабораторным и полевым методом на примере искусственных и природных песчано-глинистых смесей;

- построение и анализ дисперсионных кривых по результатам лабораторных измерений ДП только на песчано-глинистых смесях искусственного происхождения;

- оценка влияния весовой и объемной влажности песчано-глинистых отложений искусственного и природного происхождения на значение диэлектрической проницаемости, определенное по полевому и лабораторному методам измерений.

Для решения поставленных задач в работе был проведен физический эксперимент по измерению ДП лабораторным и полевым методами искусственных песчано-глинистых смесей с различными гранулометрическим составом и объемной влажностью. Вторая часть работы посвящена анализу результатов таких же измерений на природных песчано-глинистых отложениях.

Методы измерения диэлектрической проницаемости. Рефлектометрия во временной области. В данной работе для измерения ДП отложений в естественных условиях применялся метод спектрометрии во временной области. Использовался прибор TDR200 (Campbell Scientific, Inc.), включающий блок TDR200, коаксиальный кабель, трехстержневой зонд длиной 0,3 м и программное обеспечение PC-TDR. Методически работы выполнялись следующим образом: зонд погружался в емкость с песчано-глинистой смесью в случае физического эксперимента и в стенку шурфа в случае натурных измерений, а затем на него подавался электромагнитный импульс, после чего регистрировались параметры

отраженного сигнала, а в программе отображались значения диэлектрической проницаемости и проводимости. В методе измеряется время t прохождения импульса в разомкнутом отрезке двухпроводной линии длиной L (длина зонда), погруженной в грунт, от генератора до конца зонда и обратно. Физически погружение зонда в грунт означает подключение к коаксиальному кабелю с волновым сопротивлением $Z_0 = 50$ Ом резистора с сопротивлением $R > Z_0$, характерным для большинства геологических пород, что приводит к изменению импеданса зонда и образованию отражения излученного импульса. Время прохождения импульса t определяется скоростью распространения электромагнитной волны в материале, окружающем зонд и связано с кажущейся диэлектрической проницаемостью K_a по формуле:

$$t = \frac{2L\sqrt{K_a}}{c}, \quad (1)$$

где t — время прохождения, с; L — длина зонда TDR, м; c — скорость света, м/с. Из уравнения (1) можно выразить кажущуюся диэлектрическую проницаемость ($L_a = ct/2$).

Выходным результатом измерения является одно значение ДП и проводимости.

Коаксиальная ячейка. Для определения в лабораторных условиях электромагнитных параметров жидких и сыпучих материалов в широкополосном диапазоне частот применяется метод коаксиальной линии. Основу установки составляет коаксиальная ячейка — отрезок коаксиальной линии, заполненный исследуемым веществом и подключенный к векторному анализатору цепей [Молостов, Щербинин, 2015]. В работе использовалось оборудование производства НПО «Терразонд» (г. Томск, Россия): двухпортовый векторный анализатор цепей Planar S5045 с диапазоном рабочих частот от 9 кГц до 4,5 ГГц, коаксиальная ячейка, коаксиальные кабели и программное обеспечение Cell. Измерения проводились для 36 образцов (6 смесей при 6 различных объемных влажностях в интервале 0–35 %). Перед началом измерений для обеспечения стабильных результатов выполняется калибровка анализатора цепей, затем коаксиальная ячейка заполняется образцом таким образом, чтобы он полностью покрыл проводник-стержень, проходящий через центр ячейки. Далее на порты анализатора подается сигнал из заданного диапазона частот 30–1000 МГц, который, проходя через образец в ячейке, отражается. Физический принцип измерения основан на том, что ячейка представляет собой четырехполюсник, у которого с помощью векторного анализатора измеряется комплексный коэффициент отражения. Для этого на вход и выход ячейки подается падающая волна с амплитудами \dot{a}_1 и \dot{a}_2 , а регистрируется отраженная волна с амплитудами \dot{b}_1 и \dot{b}_2 . Образование отражения связано с тем, что ячейка с образцом представляет собой нагрузку с волновым сопротив-

лением большим, чем сопротивление коаксиальных кабелей (50 Ом).

Связь между амплитудами падающей и отраженной волн описывается S -параметрами и для четырехполюсника выражается как [Сазонов, 1988]:

$$\begin{aligned} \dot{b}_1 &= \dot{S}_{11}\dot{a}_1 + \dot{S}_{12}\dot{a}_2, \\ \dot{b}_2 &= \dot{S}_{21}\dot{a}_1 + \dot{S}_{22}\dot{a}_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Векторный анализатор вычисляет по амплитудам волн параметры \dot{S}_{11} и \dot{S}_{22} , которые имеют физический смысл комплексного коэффициента отражения. В работе [Curtis, 2001] приводится уравнение для определения ДП по результатам измерений, которое решается итерационным методом:

$$\cos \frac{\omega d \sqrt{\epsilon}}{c} = \frac{1 + S_{21}^2 - S_{11}^2}{2S_{21}}, \quad (3)$$

где ω — круговая частота, d — длина пробы, c — скорость распространения электромагнитных волн в вакууме, ϵ — комплексная диэлектрическая проницаемость.

Выходным результатом измерений в коаксиальной ячейке являются дисперсионные кривые действительной и мнимой частей ДП, проводимости, тангенса угла потерь. Для дальнейшего анализа использовалась только действительная часть ДП, находилось среднее арифметическое в интервале частот от 100 до 500 МГц, так как в этом интервале не наблюдалось изменения ДП. Мнимая часть ДП, как и проводимость, не анализировались, так как это выходит за рамки данного исследования.

Методика измерений физических параметров образцов. Измерение влажности образцов. В работе объемная влажность W с помощью кольца определялась только для природных образцов: влажный грунт отбирался в кольцо заданного объема, после его высушивания определялась масса и рассчитывался объем воды при принятой плотности воды 1 г/см^3 . Объемная влажность W рассчитывалась по формуле:

$$W = \frac{V_1}{V_0} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где V_1 — объем воды в образце, $V_0 = 81,4 \text{ см}^3$ — объем влажного образца, равный объему используемого кольца.

В дополнение к объемной влажности измерялась весовая влажность по ГОСТ 5180-2015, как для природных отложений, так и для искусственных смесей. Весовая влажность w в процентах рассчитывается по формуле:

$$w = \frac{m_1 - m_0}{m - m} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где m_1 — масса влажного грунта с бюксом; m_0 — масса высушенного грунта с бюксом; m — масса пустого бюкса.

Измерение гранулометрического состава отложений. Гранулометрический состав измерялся только для образцов природных отложений, так как в случае искусственных смесей их состав контролировался. В качестве прибора использовался лазерный анализатор Microtrac Bluewave, ультразвуковой гомогенизатор Scientz-750F (Scientz Bio, КНР). Размеры частиц были разделены на 2 фракции в соответствии с классификацией по Н.А. Качинскому: меньше 10 мкм (физическая глина) и больше 10 мкм (физический песок) [Качинский, 1958]. Для соответствия с данными физического эксперимента, полученные соотношения физического песка и глины для природных отложений были округлены до десятков по каждому образцу.

Дизайн эксперимента по измерению электромагнитных параметров искусственных смесей.

Для решения поставленных задач в исследовании был проведен эксперимент по измерению электромагнитных параметров искусственных песчано-глинистых смесей разной влажности, изготовленных в объемах, необходимых для измерения с помощью методов TDR и коаксиальной ячейки. Измерения методом TDR предполагают, чтобы расстояние по вертикали от конца вилки зонда до дна емкости было как минимум 5 см, такое же расстояние должно выдерживаться от краев зонда до стенок. Учитывая размеры самого зонда (21 см в длину и 5 см в ширину) и необходимые минимальные расстояния, в качестве емкости были выбраны пластиковые сосуды объемом 5 л. Суть эксперимента заключается в возможности контроля объемной влажности и гранулометрического состава. Так, в качестве твердых компонент смесей были выбраны кварцевый песок с размером зерен 0,16–0,63 мм и голубая кембрийская глина. Для эксперимента были подготовлены шесть емкостей, содержащих сухие песок и глину в объемных соотношениях: 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80 (рис. 1).

В качестве жидкой компоненты была выбрана дистиллированная вода, путем добавления которой в определенном объеме (в мл) последовательно изменялась объемная влажность в каждой смеси: 0, 10, 15, 20, 30, 35 %. После каждого добавления воды в смесь содержимое размешивалось с помощью строительного миксера до однородного состояния.



Рис. 1. Подготовленные сухие песчано-глинистые смеси в процессе измерения методом TDR ДП смеси в емкости № 5 (с указанием номеров и процентных соотношений в них песка/глины)

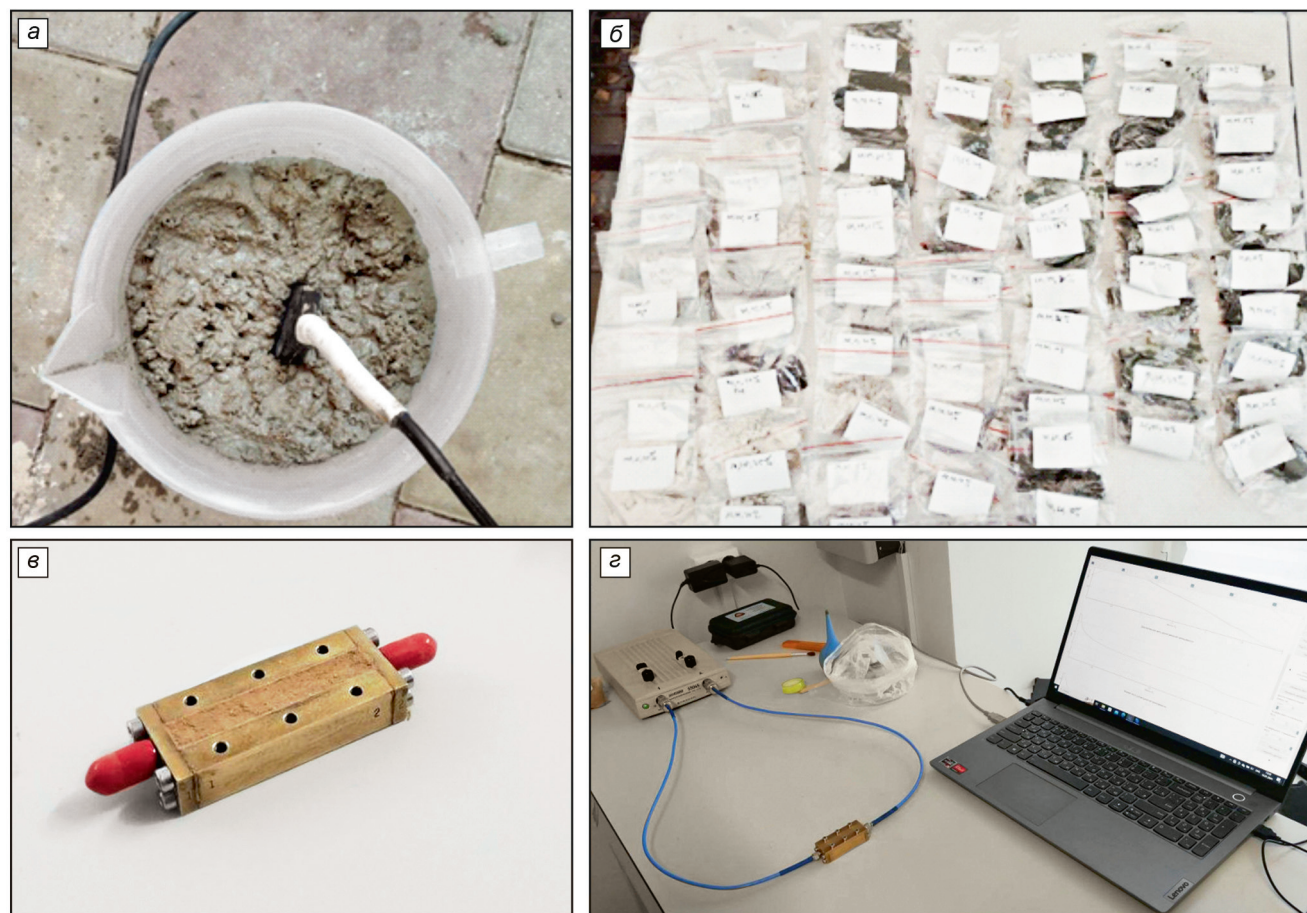


Рис. 2. Этапы проведения физического эксперимента и лабораторных измерений: а — зонд TDR во влажной смеси, б — отобранные образцы в пакетах (масса образца менее 50 г), в — коаксиальная ячейка с образцом, г — установка для лабораторных измерений ДП в процессе работы

Для каждой смеси при различной влажности были проведены измерения методом TDR, а также отобраны образцы для лабораторных измерений в коаксиальной ячейке (рис. 2). Перед измерениями выполнялась калибровка TDR для определения длины окна и кабеля, необходимых для дальнейших пересчетов времени в значения ДП. Процесс калибровки состоит в измерениях ДП дистиллированной воды и воздуха известной температуры.

Ход эксперимента можно описать поэтапно:

1. Измерение методом TDR шести сухих песчано-глинистых смесей и отбор 6 образцов.

2. Добавка в емкость № 1 500 мл воды для обеспечения объемной влажности 10 %, перемешивание до однородности с помощью миксера, отбор образца в zip-пакет, измерение TDR (рис. 3).

3. Добавка в емкость № 1 250 мл воды для обеспечения объемной влажности 15 %, перемешивание до однородности с помощью миксера, отбор образца в zip-пакет, измерение TDR. Далее этот процесс для емкости № 1 повторяется до достижения влажности 35 %.

4. Аналогично повтор этапов 2 и 3 для емкостей № 2–6.

5. После окончания измерений методом TDR отобранные образцы помещались в коаксиальную ячейку для измерения ДП в лабораторных условиях.

Измерения электромагнитных параметров природных отложений.

Важным в работе является анализ сходимости методов на примере природных образцов, которые отличаются многокомпонентным составом, наличием разного рода включений (фрагменты растений, ожелезненные прослои), и конечно, имеют ограниченный диапазон изменения объемной влажности. В качестве природного объекта исследования были выбраны две противоположные друг другу зачищенные стенки шурфа, вскрытого на участке высокой поймы р. Гусь в районе с. Лесуново Рязанской области (рис. 3). Расположение шурфа и его размеры (2,2 м по ширине и 1,6–1,85 м по глубине) выбраны на основании георадарного профилирования, в ходе которого на радарограмме 400 МГц в этом месте в верхних 2 м была зафиксирована контрастная граница, полого спускающаяся в сторону уреза реки. В разрезе специалистом-почвоведом были выделены три основных типа пород: супесь, суглинки, песок, поэтому разрез идентифицируется как песчано-глинистый.

На двух стенках вдоль вертикальных линий (обозначены красным) с шагом 5 см по глубине проведены измерения электромагнитных параметров методом TDR (рис. 3). Из этих точек измерения были отобраны образцы для определения объемной

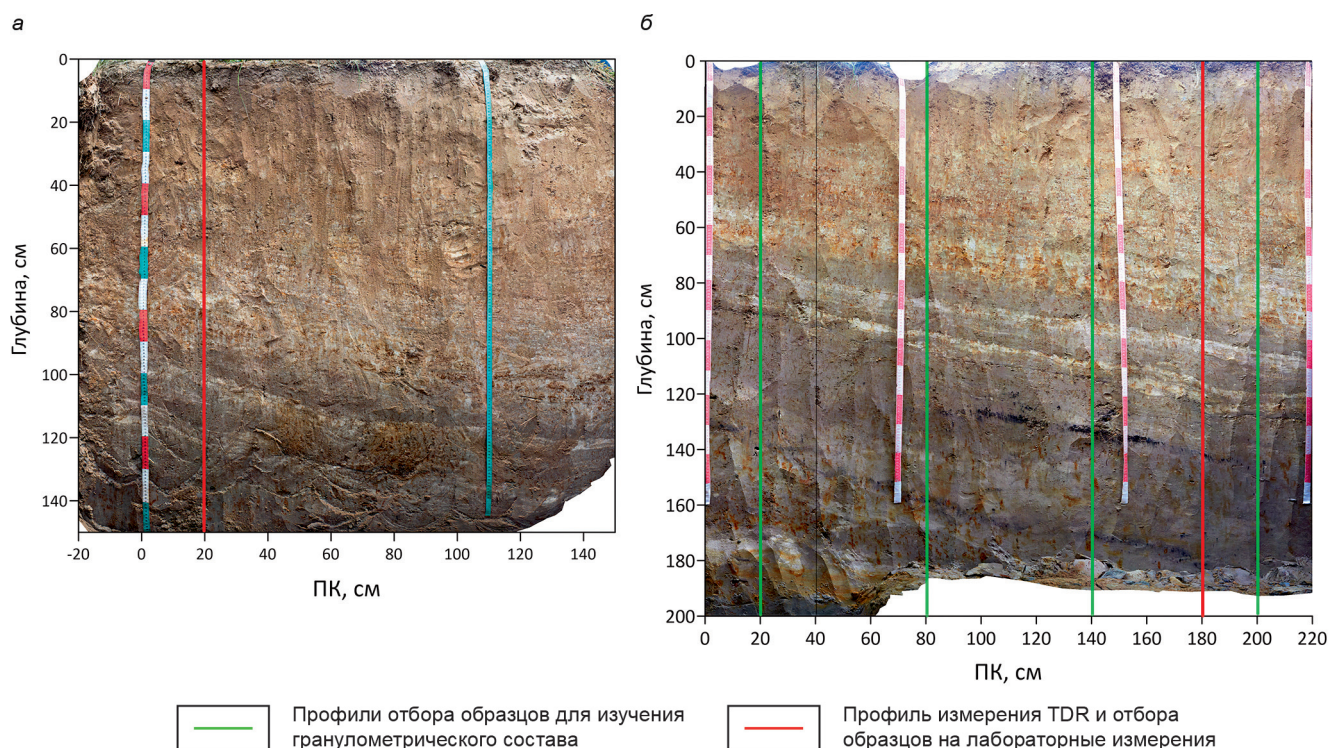


Рис. 3. Фото стенок шурфа: а — северная, б — южная, с обозначением профилей прямых измерений и мест отбора образцов

и весовой влажности, а также для лабораторного измерения ДП в коаксиальной ячейке. Всего было отобрано 60 образцов (по 30 с каждой стенки) природных песчано-глинистых отложений. С южной стенки шурфа дополнительно были отобраны образцы на ПК 20, 80, 140 и 200 см с шагом 10 см по глубине для изучения гранулометрического состава отложений, необходимого для более точного определения типов пород в разрезе.

Результаты. С помощью графиков на рис. 4 проанализирована сходимость результатов измерения ДП по двум методам в зависимости от изменения объемной влажности искусственных песчано-глинистых смесей. Общий тренд изменения ДП по двум методам близок к линейному, по форме кривые подобны. С увеличением влажности от значения ДП по двум методам возрастают, что не противоречит теории. Отметим тот факт, что все значения ДП смесей с содержанием глины до 40 %, измеренные в коаксиальной ячейке, ниже, чем значения, полученные с помощью TDR. Замечено также, что при росте числа глинистых частиц в смеси некоторые значения ДП по ячейке превышают значения по TDR. Максимальные расхождения между измерениями преимущественно приурочены к смесям со влажностью 30–35 %. За исключением смесей 60/40 и 20/80, у которых величина самого расхождения не коррелирует ни с влажностью, ни с содержанием глины в смеси. Наибольшие по величине расхождения относятся к смесям, приближенным к однокомпонентным: чистому песку (расхождение ДП составило 6,4) и смеси, на 80 % состоящей из глины (6,3). Также стоит отметить, что минимальное рас-

хождение между значениями (0,6) наблюдается для сухих смесей, причем значение ДП по лабораторному методу для сухой смеси с наибольшим содержанием глины превосходит значение по TDR. Причина, по которой значения ДП в коаксиальной ячейке для более глинистых смесей могут превышать значения, измеренные методом TDR, является уплотнение: более дисперсные смеси могут в большей массе заполнить объем ячейки, уменьшив при этом объем воздуха.

На рис. 5 представлены аналогичные зависимости для смесей природного происхождения, содержание в которых физического песка и глины было округлено до десятков. Таким образом, природную смесь можно считать двухкомпонентной и сравнивать со смесями, используемыми в физическом эксперименте. Главным отличием от искусственных смесей является нелинейный тренд изменения ДП в зависимости от объемной влажности, но по форме кривые также подобны. Наблюдается увеличение максимального расхождения до 7,7. Все значения ДП по лабораторному методу ниже, чем по TDR, однако для данных соотношений песка и глины в природных отложениях, результаты согласуются с физическим экспериментом, так как там нет образцов, содержащих более 20 % частиц глинистой размерности.

Причина нелинейного тренда и увеличения величины расхождения в случае природных образцов может быть связана с более грубой классификацией по гранулометрическому составу, наличием включений (оксидов железа, остатки растений, обломки), которые влияют на лабораторные измерения, изменяя поровое пространство образца.

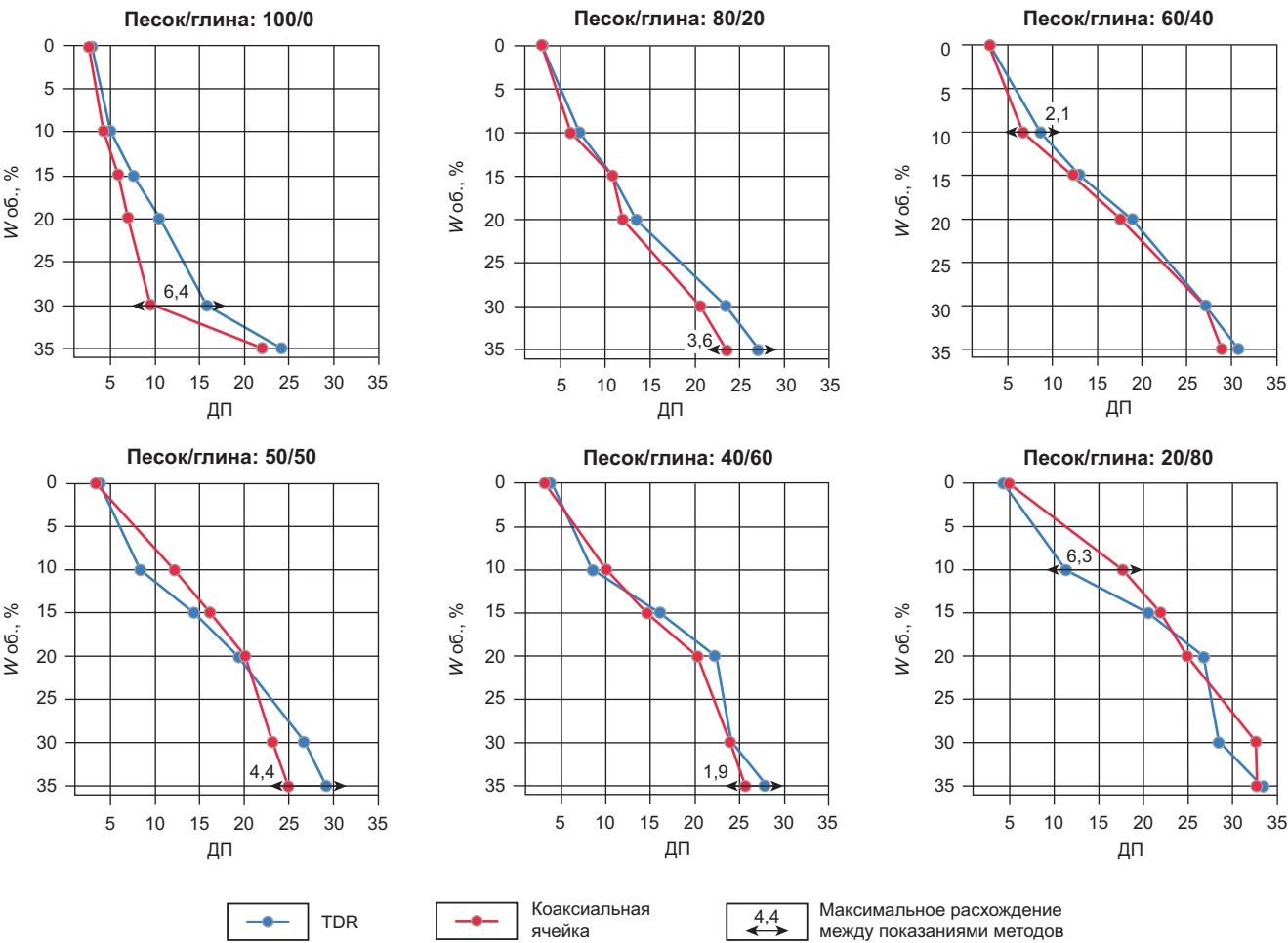


Рис. 4. Графики зависимости ДП от объемной влажности для искусственных песчано-глинистых смесей различного соотношения, полученные по двум методам измерения



Рис. 5. Графики зависимости ДП от весовой влажности для природных песчано-глинистых смесей различного соотношения по двум методам измерения

Выше проводилась оценка сходимости результатов измерений по двум методам, однако, стоит напомнить, что выходным результатом метода TDR является одно значение ДП и проводимости, в то время как с помощью векторного анализатора в лабораторном методе получается набор значений ДП, зависящих от частоты. Для сравнения в данной работе и в общем для целей интерпретации георадарных данных, используются средние значения ДП в интервале частот от 100 до 500 МГц. Однако важно пронаблюдать как изменяются эти значения в пределах так называемого «георадарного пла-

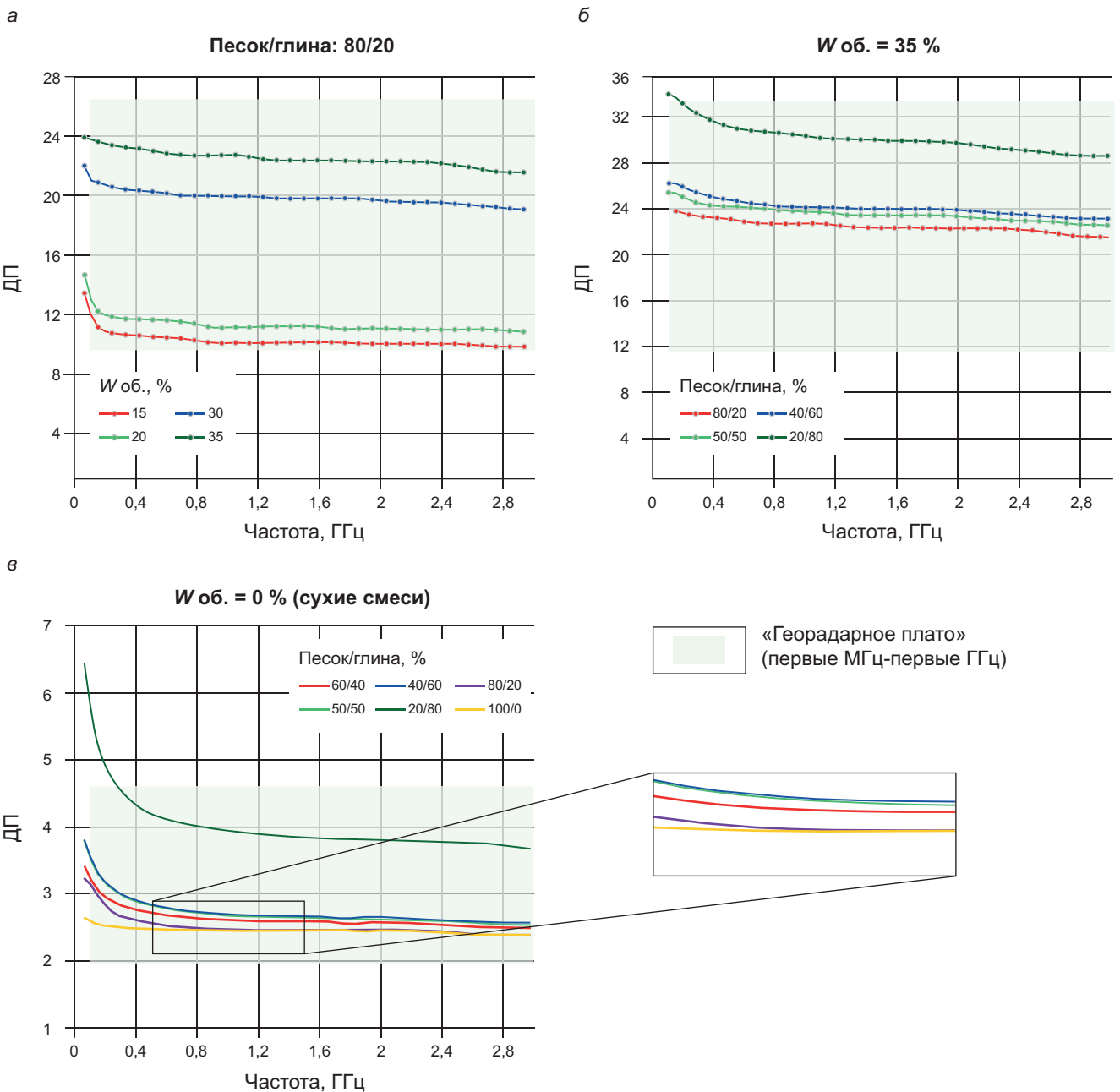


Рис. 6. Зависимости ДП от частоты для смесей: а — с соотношением песок/глина 80/20 для различной объемной влажности, б — фиксированной объемной влажности 35 % для различных соотношений песка и глины, в — фиксированной объемной влажности 0 % (сухие) для различных соотношений песка и глины

то» — частотного диапазона, внутри которого ДП считается не зависящей от частоты. Это необходимо для проверки корректности работы коаксиальной ячейки и возможности такого осреднения в выбранном интервале частот, так как это может быть одной из причин расхождений, описанных выше. Были построены графики изменения ДП с частотой от 30 МГц до 3 ГГц для смесей с соотношением песок-глина 80–20 % при различной влажности, а также при фиксированных влажностях 35 % и 0 %, но разных соотношениях компонентов только для искусственных смесей, чтобы исключить случайные природные факторы. Для построенных дисперсионных кривых анализировался «перепад» значений ДП на первой частоте диапазона (100 МГц) и на последней — 3 ГГц.

На рис. 6, а видно, что в диапазоне «георадарного плато» наблюдается наибольший перепад значений ДП в пределах 10 %, отвечающий максимальной объемной влажности — 35 %, с уменьшением влажности значения в диапазоне 500 МГц — 3 ГГц стабилизируются, а в случае сухих образцов вариаций не наблюдается. Помимо этого, на увеличенном фрагменте видно, что значения ДП практически совпадают для смесей с соотношениями песок/глина 50/50 и 40/60, а также 80/20 и 100/0 (рис. 6, в). Среди дисперсионных кривых при объемной влажности 35 % наибольшим перепадом значений ДП в 15 % обладает самая глинистая смесь с содержанием глины 80 %. Затем, с убыванием содержания глины в смесях до чистого песка, снижаются перепады в значениях,

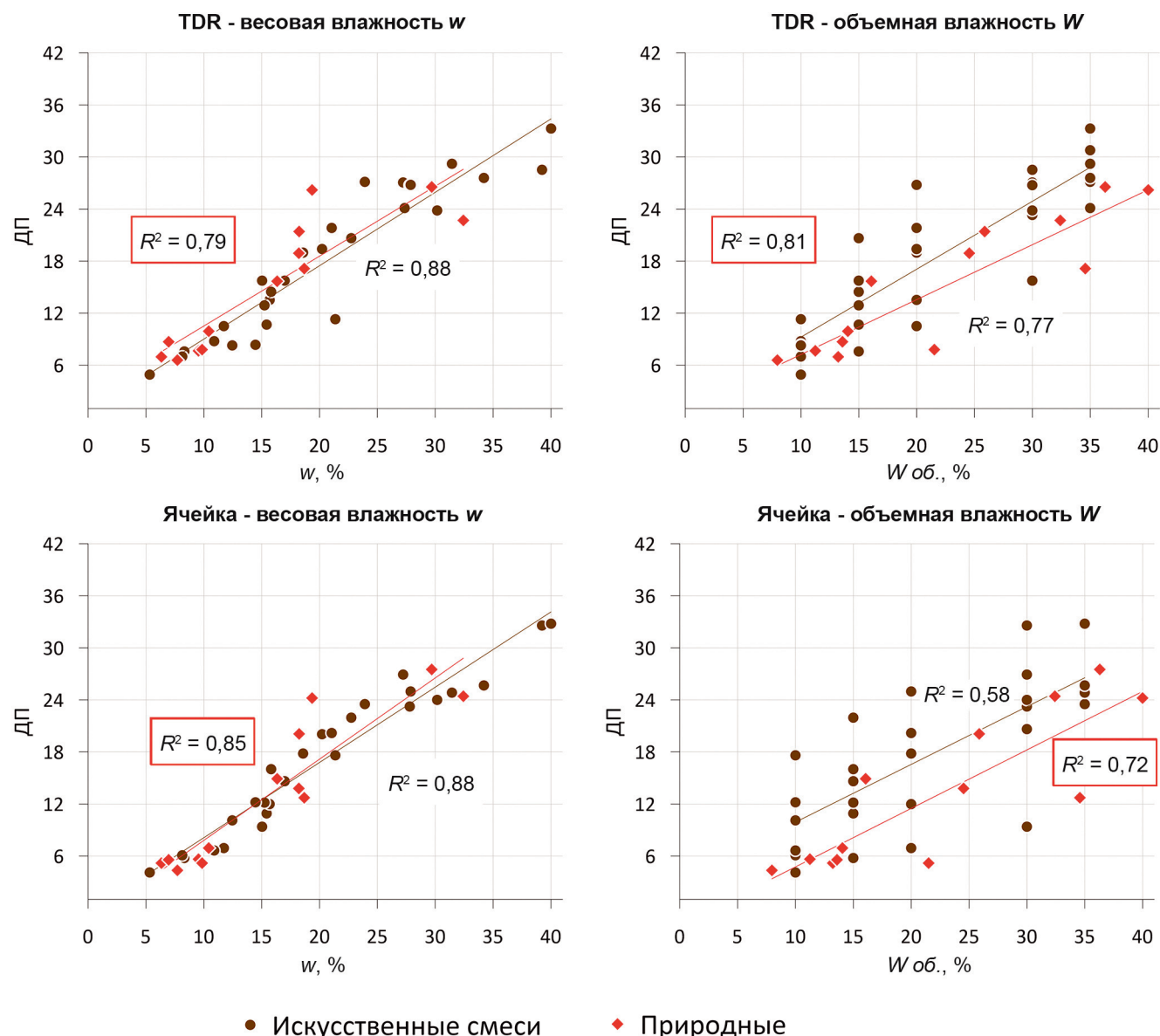


Рис. 7. Корреляционные зависимости ДП, измеренной по методам TDR и коаксиальной ячейке с весовой и объемной влажностью на примере искусственных и природных песчано-глинистых смесей (в красном прямоугольнике выделены коэффициенты детерминации R^2 для природных смесей)

они составляют 11 %, 10 % и 9 % (рис. 6, б). Стоит обратить внимание на кривую 20/80 на рис. 6, в — значения ДП для этой смеси в 1,5 раза выше, чем для смеси, где песка вдвое больше (40/60). Это указывает на методические особенности измерений в ячейке: у более мелкодисперсных сухих отложений упаковка получается плотнее.

Наблюдаемые зависимости находят противоречие с имеющимися представлениями о выдержанности «георадарного плато». Согласно теории [Владов, Судакова, 2017] кривые зависимости действительной части диэлектрической проницаемости песчано-глинистых грунтов после частоты 10^6 Гц выходят на асимптоту и остаются примерно постоянными до частоты 10^9 – 10^{10} Гц. Однако такого поведения у дисперсионных кривых в данной работе не наблюдается, присутствует зависимость от частоты в области до 200 МГц (значения ДП снижаются почти 10 %). По-

хожий факт авторами был замечен в работах [Бобров и др., 2019; Owenier, et al., 2016; Curtis, 2003], где рассматриваются лабораторные зависимости ДП от частоты в диапазоне от первых МГц до десятков ГГц. Причина, по которой на частотах ниже 200 МГц ДП резко возрастает, может быть связана с краевыми эффектами. Анализ сложившихся представлений о выдержанности «георадарного плато» требует отдельного исследования.

Для решения последней из задач необходимо было проанализировать связи ДП, определенной по двум методам, с весовой и объемной влажностью (рис. 7). Из теории [Торр, et al., 1980] известно, что ДП, измеренная с помощью метода TDR, имеет высокую сходимость именно с объемной влажностью. Однако определение этого типа влажности зачастую затруднительно, поскольку требует извлечения образца известного объема и дополнительного знания

плотности воды, в результате в распоряжении исследователей обычно имеется только весовая влажность отложений. Поэтому важно провести сравнение результатов измерения двумя методами по двум типам влажности для искусственных и природных песчано-глинистых отложений.

Для искусственных смесей корреляции по двум методам получились выше с весовой влажностью, так как она определяется в лабораторных условиях, в малом объеме и поэтому более точно. А точность в определении объемной влажности ниже, что связано с различными процессами, происходящими в большом объеме образца (5 л): например, уменьшение объема всей влажной смеси за счет просадки, при фиксированном объеме вылитой воды [Трофимов, 2005]. Несмотря на то, что измерения проводились быстро, уменьшение смеси в объеме сказалось на результатах сопоставления ДП и объемной влажности. Тем не менее, коэффициент детерминации между значениями ДП и объемной влажности для полевого метода TDR на 32 % выше, чем для лабораторного. Объемная влажность природных отложений измерялась с помощью кольца, поэтому результаты являются более точными и согласуются с теорией: ДП, измеренная методом TDR, имеет большую связь с объемной влажностью, чем с весовой (рис. 7). Важным является наблюдение, что ДП, измеренная лабораторным путем, имеет более тесную связь с весовой влажностью, чем с объемной, как в случае искусственных, так и в случае природных смесей.

Выводы. В исследовании рассматриваются два метода измерения диэлектрической проницаемости, которые могут уточнить геологическую интерпретацию георадарных данных в зависимости от условий: наличия скважин и/или обнажений. Рассмотрим выводы в соответствии с поставленными в работе задачами.

1. Оценку сходимости результатов измерений диэлектрической проницаемости по двум методам корректнее производить на примере искусственных песчано-глинистых смесей, так как они имеют однородный, предсказуемый состав. В таком случае исключаются случайные факторы и увеличивается вероятность, что наблюдаемые расхождения в измеренных значениях отражают методические особенности работы приборов. Критерием «корректности» является линейность тренда изменения диэлектрической проницаемости, например, с объемной влажностью. Нелинейность и расхождения увеличиваются при работе с природными отложениями. На величину и частоту расхождений значений диэлектрической проницаемости, полученных полевым и лабораторным методами, влияют факторы, связанные с особенностями измерений в коаксиальной ячейке. А именно, требование предварительной обработки образца, в ходе которого

он измельчается, может быть немного подсушен или, наоборот, увлажнен при транспортировке в лабораторию. Поэтому, например, для измельченных мелкодисперсных отложений упаковка образца в ячейку может оказаться более плотной, чем в естественных условиях, что приведет к завышению значений, это наблюдалось для смесей с содержанием глины более 50 %. В случае присутствия излишней влаги возможен эффект «отжимания» воды из образца при упаковке грунта в ячейку и/или закрытии ее крышкой. В случае природных образцов расхождения увеличиваются за счет добавочного влияния неточностей, связанных с полевым методом измерения TDR: с неплотным прилеганием вилки зонда к грунту, попаданием в различные пустоты (кратовины, корневые системы). Третьим фактором является выбор диапазона частот для осреднения значения, особенно в случае влажных и глинистых образцов. Этот фактор связан с задачей 2.

2. Было показано, что так называемое георадарное плато — диапазон частот от первых МГц до первых ГГц [Владов, Судакова, 2017], в пределах которого диэлектрическая проницаемость незначительно изменяется с частотой — в настоящей работе имеет другой предел в области низких частот. Анализ дисперсионных кривых для искусственных смесей показал, что значения диэлектрической проницаемости стабилизируются в диапазоне от 500 МГц до 3 ГГц, и только в нем могут использоваться для выбора среднего значения ДП.

3. Результаты исследования показали, что диэлектрическая проницаемость, определенная с помощью коаксиальной ячейки, имеет более тесную взаимосвязь с весовой влажностью, чем с объемной. Это важно для корректного построения калибровочных зависимостей, поскольку выбор метода измерения влажности и способа определения ДП существенно влияет на результат.

Благодарности. Данное исследование требовало привлечения компетенций, которыми не обладают авторы статьи, в частности, знаний об отложениях и ландшафтах, методик отбора образцов и умения анализировать их свойства. За помощь в этой работе авторы признательны к.г.н. Шилову П.М. (Почвенный институт им. В.В. Докучаева), а также коллегам-географам Матасову В.М., Лобачевой Д.М., Шашериной Л.В., Роганову С.Б., Мироненко И.В. и Федину А.В. Мы также благодарим к.г.-м.н. Рязанцева П.А. (Институт геологии КарНЦ РАН) за содействие в проведении измерений методом TDR и плодотворные обсуждения результатов. Лабораторные измерения проводились на оборудовании геофизической группы Института географии РАН.

Финансирование. Работа выполнена в рамках тем Государственного задания Института географии РАН № FMWS-2024-0005 и геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бобров П.П., Беляева Т.А., Крошка Е.С. и др. Определение влажности образцов почв диэлектрическим методом // Почвоведение. 2019. № 7. С. 859–871.
- Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений: Учебное пособие. М.: ГЕОС, 2017. 240 с.
- Касимова А.У., Верзунов С.Н. Обзор современных методов измерения диэлектрической проницаемости горных пород // Проблемы автоматики и управления. 2022. № 1. С. 33–49.
- Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. Акад. наук СССР. Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1958. 192 с.
- Крылов С.С., Бобров Н.Ю., Прякина Г.В. и др. Особенности распространения и трансформации речных вод в приливном эстуарии р. Кереть // Метеорология и гидрология. 2014. № 10. С. 54–64.
- Молостов И.П., Щербинин В.В. Коаксиальная измерительная ячейка для широкополосных измерений диэлектрической проницаемости // Известия Алтайского государственного университета. 2015. № 1–2. С. 56–60.
- Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. Учебник для радиотехнических специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1988. 432 с.
- Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: Учебное пособие по курсу «Георадиолокация». 2-е изд., испр. и доп. М.: КДУ; Добросвет, 2023. 258 с.
- Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А. и др. Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
- Botha G., Bristow C., Porat N., et al. Evidence for dune reactivation from GPR profiles on the Maputaland coastal plain, South Africa // Geological Society London Special Publications. 2003. Vol. 211. No. 1. P. 29–46.
- Curtis J.O. A Durable Laboratory Apparatus for the Measurement of Soil Dielectric Properties // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2001. Vol. 50. No. 5. P. 1364–1369.
- Davis J.L., Chudobiak W.J. In-situ meter for measuring relative permittivity of soil // Geological Survey of Canada. 1975. No. 1A. P. 75–79.
- Heimovaara T.J. Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms: 1. Measurement of the complex dielectric permittivity of soils // Water Resources Research. 1994. Vol. 30. No. 2. P. 189–199.
- Kelleners T.J., Robinson D.A., Shouse P.J., et al. Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 2005. Vol. 69. No. 1. P. 67–76.
- Knoll M.D. A petrophysical basis for ground penetrating radar and very early time electromagnetics: Electrical properties of sand-clay mixtures: Ph.D. thesis, University of British Columbia. 1996. P. 316.
- Owenier F., Hornung J., Hinderer M. Substrate-sensitive relationships of dielectric permittivity and water content: implications for moisture sounding // Near Surface Geophysics. 2016. Vol. 16. No. 2. P. 128–152.
- Rust A.C., Russell J.K., Knight R.J. Dielectric Constant as a Predictor of Porosity in Dry Volcanic Rocks // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1999. Vol. 91, No. 1. P. 79–96.
- Schon J.H. Physical Properties of Rocks. Amsterdam: Elsevier. 2011. Vol. 8. P. 481.
- Shenhui J., Ding D., Quanxing J. Measurement of Electromagnetic Properties of Materials Using Transmission/Reflection Method in Coaxial Line // Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics. 2003. CEEM 2003. Proceedings. P. 590–595.
- Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission line // Water Resources Research. 1980. Vol. 16, No. 3. P. 574–582.
- Van Dam R.L., Schlager W., et al. Iron oxides as a cause of GPR reflections // Geophysics. 2002. Vol. 67. No. 2. P. 536–545.

Статья поступила в редакцию 16.05.2025,
одобрена после рецензирования 23.05.2025,
принята к публикации 30.10.2025