

УДК 53.082.722:631.432.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ОБРАЗЦОВ ПОЧВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

© 2019 г. П. П. Бобров¹, *, Т. А. Беляева¹, Е. С. Крошка¹, О. В. Родионова¹¹Омский государственный педагогический университет, Россия, 644099, Омск, наб. Тухачевского, 14

*e-mail: bobrov@omgpi.ru

Поступила в редакцию 13.04.2018 г.

После доработки 11.10.2018 г.

Принята к публикации 28.11.2018 г.

Рассмотрены способы измерения влажности почв диэлектрическим методом. Установлено, что на показания датчиков, использующих разные физические принципы, комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) оказывает разное влияние. Приведены результаты измерения КДП шести образцов: речного песка, бентонита, трех образцов чернозема обыкновенного (Haplic Chernozem (Loamic)) Омской области и смеси чернозема и речного песка. Содержание физической глины (частиц размером менее 0.01 мм) в образцах изменялось от 1.7 до 72%, содержание органического углерода — от 0 до 4.12%. Измерения КДП производились при разных значениях влажности в диапазоне частот от 10 кГц до 4–8 ГГц в одной и той же ячейке с использованием разработанной авторами оригинальной методики. Выявлено, что на частотах ниже 20–30 МГц сильное влияние на КДП оказывают процессы межслойной диэлектрической релаксации и проводимость почвенного раствора, вследствие чего диэлектрическая проницаемость является неоднозначной функцией влажности. Измерения влажности лучше всего проводить в диапазоне частот 0.5–3 ГГц, где влияние межслойной релаксации и проводимости почвенного раствора на КДП незначительно. Выполнены измерения влажности и удельной проводимости почв емкостным датчиком Decagon 5TE. Найдена калибровочная зависимость, включающая измеряемую этим датчиком проводимость, справедливая для разных почв. Погрешность измерения влажности с использованием этой зависимости составляет $0.035 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Применение индивидуальных калибровочных зависимостей для каждой из почв позволяет снизить погрешность до $0.014 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Результаты работы могут быть использованы для увеличения точности определения влажности почв диэлектрическим методом.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость почв, удельная электрическая проводимость, оптимальный диапазон частот, чернозем обыкновенный среднегумусный (Chernozem)

DOI: 10.1134/S0032180X19050034

ВВЕДЕНИЕ

Влажность почвы является важной переменной в гидрологическом моделировании, управлении водными ресурсами, в сельском хозяйстве, в метеорологии и климатологии. Влажность почвы влияет на коэффициенты излучения и отражения в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитных волн и определяет распределение падающей на поверхность земли солнечной энергии на отраженную и затраченную на испарение, эвапотранспирацию, нагрев и фазовые переходы. От влажности зависят многие почвенные свойства: механическая прочность, влагопроводимость, капиллярно-сорбционный потенциал, диэлектрическая проницаемость и др.

В настоящее время измерения влажности почвы производят как в локальном (точечном), так и в глобальном (от сотен квадратных километров) масштабах. При наземных измерениях используют разные физические методы. Обзор таких мето-

дов приведен в литературе [22]. Наиболее популярными являются неразрушающие электромагнитные методы, поскольку они способствуют быстрой оценке содержания воды в почве. В континентальных масштабах влажность измеряют с помощью микроволновых радиометров и радиолокаторов, устанавливаемых на космических аппаратах (КА).

Микроволновые радиометры чувствительны к собственному тепловому излучению поверхности почв и не требуют внешней подсветки. Радиолокаторы принимают излучение поверхности, рассеянное в обратном направлении, поэтому на борту КА имеется достаточно мощный генератор электромагнитного излучения. Спутниковые методы находятся в завершающей стадии тестирования, но уже сейчас данные о влажности почв с ряда КА находятся в открытом доступе. К таким аппаратам относится спутник Европейского космического агентства SMOS с рабочей частотой

радиометра, равной 1.4 ГГц, и аппарат NASA SMAP с такой же рабочей частотой радиометра [39]. Спутник Японского космического агентства GCOM-W1 имеет на борту многоканальный радиометр AMSR-2 на более высокие частоты, из которых для определения влажности почвы могут быть использованы частоты 6.9 и 10.7 ГГц. Недостатком всех дистанционных микроволновых методов, включая радиометрические, является малая глубина зондирования, составляющая первые десятки доли длины волны (на частоте 1.4 ГГц это 2–5 см). Другим существенным недостатком радиометрического метода при установке радиометра на КА является малая разрешающая способность. Размер территории, излучающей в один пиксель радиометрического снимка, зависит от рабочей частоты, конструкции антенны и обычно составляет более 10 км. Разрешающая способность радиолокаторов с синтезированной апертурой лучше и приближается к разрешающей способности оптических сенсоров. Радиолокатор, установленный на спутнике Европейского космического агентства Sentinel-2, имеет разрешающую способность около 10 м, однако основным недостатком радиолокационного метода является сильное влияние шероховатости поверхности, более сильное, чем влияние влажности. Достоинства радиолокационного и радиометрического методов могут быть использованы при совместной обработке данных [32].

Основой всех электромагнитных методов, как дистанционных, так и контактных, является зависимость комплексной относительной диэлектрической проницаемости (КДП) $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$ от влажности. Здесь ϵ' и ϵ'' – действительная и мнимая части КДП соответственно.

Действительная часть КДП (далее ДП) ϵ' показывает, во сколько раз увеличится емкость пустого конденсатора после заполнения его диэлектриком. Мнимая часть КДП описывает потери энергии в веществе и может быть представлена в виде двух составляющих:

$$\epsilon'' = \epsilon''_{rel} + \sigma / 2\pi f \epsilon_0. \quad (1)$$

Первый член ϵ''_{rel} описывает потери, обусловленные процессами диэлектрической релаксации, а второй – ионной проводимостью. Здесь σ – удельная электропроводность (УЭП), f – частота электромагнитного поля, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная (абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума).

Комплексный показатель преломления (КПП) n^* связан с комплексной диэлектрической проницаемостью соотношением:

$$n^* = n - ik = \sqrt{\epsilon' - i\epsilon''}. \quad (2)$$

Действительная часть КПП (n) показывает, во сколько раз скорость электромагнитной волны в

данном веществе меньше скорости в вакууме. Мнимая часть (k) определяет затухание электромагнитной волны при ее распространении в среде. Действительная часть КПП зависит как от действительной, так и мнимой частей КДП и для немагнитных сред имеет вид [7]:

$$n = \sqrt{\epsilon'} \sqrt{0.5 \left(1 + \sqrt{1 + (\epsilon''/\epsilon')^2} \right)}, \quad (3)$$

а мнимая часть КПП зависит от мнимой части КДП в большей степени:

$$k = \sqrt{\epsilon'} \sqrt{0.5 \left(-1 + \sqrt{1 + (\epsilon''/\epsilon')^2} \right)}.$$

При малых потерях в среде, когда $\epsilon'' \ll \epsilon'$, показатель преломления $n \approx \sqrt{\epsilon'}$, а при $\epsilon'' = \epsilon'$ он возрастает примерно на 10%. В литературе используют термин “кажущаяся” (apparent) диэлектрическая проницаемость ϵ_a , корень квадратный из которой равен действительной части КПП:

$$\sqrt{\epsilon_a} = n. \quad (4)$$

Значение ϵ_a не равно значению ϵ' , так как значения мнимой части КДП ϵ'' во влажных почвах на частотах ниже 100 МГц сопоставимы со значениями ϵ' , а на частотах ниже 20–50 МГц даже превышают их. Возрастание ϵ'' на низких частотах в засоленных почвах обусловлено, в основном, ионной проводимостью.

В датчиках для наземных точечных измерений применяются различные подходы для измерений влажности. Достаточно полные обзоры применяемых методов приведены в работах [22, 28, 29]. Зависимость КДП от влажности авторы [3, 8] связывают с гидрофизическими характеристиками почв.

В наиболее совершенных датчиках используется зависимость скорости распространения электромагнитного сигнала вдоль зонда, представляющего собой отрезок двухпроводной линии, от показателя преломления почвы. Такой метод называют спектрометрией во временной области. Распространенным вариантом этого метода является рефлектометрия во временной области (Time Domain Reflectometry – TDR), при котором измеряется время t прохождения импульса в разомкнутом отрезке двухпроводной линии длиной L , погруженной в почву, от генератора до разомкнутого конца и обратно:

$$t = 2Ln/c. \quad (5)$$

Здесь n – показатель преломления почвы, c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме.

Частотный спектр импульса зависит от скорости нарастания напряжения в импульсе и его длительности и составляет примерно от 10 МГц до 1 ГГц [35]. Верхняя частота спектра отраженного

сигнала зависит от длины зонда, качества конструкции зонда, качества соединителя и от диэлектрических свойств почвы и в сухих почвах достигает 3 ГГц, а во влажных почвах уменьшается примерно до 400 МГц [19].

В другом варианте измеряется время прохождения импульса от генератора до приемника в двухпроводной линии, имеющей форму петли. Метод называется Time Domain Transmissometry (TDT). Основным преимуществом метода TDT является его нечувствительность к паразитным многократным отражениям импульса, что приводит к более высокой точности измерений и меньшим требованиям к электронике [40]. Методы TDR и TDT работают на слабоглинистых почвах по причине слабой дисперсии диэлектрической проницаемости в используемом частотном диапазоне от 10–100 МГц до 1–3 ГГц.

В работе [36] отмечена тесная корреляционная связь между ϵ_a и влажностью для четырех почв с содержанием глины от 9 до 66%. Однако оказалось, что полученное уравнение связи справедливо только для почв с преобладанием кварца. В глинистых почвах на частотах ниже 100–500 МГц наблюдается значительное возрастание действительной и мнимой частей КДП, особенно сильное в засоленных почвах, вследствие чего различные частотные составляющие импульса распространяются с разной скоростью. Это приводит к уменьшению амплитуды импульса, изменению его формы, в том числе фронтальной части, из-за чего возникают трудности в определении момента прихода импульса. Точность измерения влажности методом TDR зависит как от точности определения времени прохождения импульса, так и от точности калибровочного уравнения зависимости ϵ_a от влажности.

Исследованию применимости метода TDR в глинистых и засоленных почвах посвящено большое число работ. Часть работ посвящена совершенствованию методики определения времени прохождения импульса и калибровки зондов [24], часть — попыткам учета диэлектрических свойств почвы, зависящих от частоты, влажности, плотности, температуры и солености [16, 23]. Установлено, что универсальное калибровочное уравнение для почв различного состава не существует, но влияние различий в плотности почвы и в содержании глины можно уменьшить, если использовать диапазон частот 0.5–1 ГГц [23].

В дешевых датчиках, например CS616 и CS625 [17], как и в методе TDR, определение влажности основано на определении скорости распространения импульса вдоль стержней, погруженных в почву. Следовательно, в этих датчиках измеряется также “кажущаяся” диэлектрическая проницаемость ϵ_a . В отличие от метода TDR, время прохождения импульса определяется частотой

внутреннего генератора. Первый запущенный импульс, отразившись от конца зонда, запускает следующий импульс и т. д. Период возникающих колебаний равен времени прохождения импульса. Вследствие меньшей скорости нарастания напряжения импульса рабочий диапазон частот ниже, чем у датчиков TDR. Частота колебаний составляет 70 МГц в воздухе и уменьшается в почвах. Разработаны датчики, импульс в которых распространяется в замкнутой линии (как в методе TDT), например SMT100. Частота колебаний составляет около 150 МГц в воде и 340 МГц в воздухе [15, 26].

В литературе описаны емкостные датчики, измеряющие влажность на относительно низких частотах от 5 до 150 МГц. Некоторые датчики, например Hydra Probe и 5TE, измеряют также УЭП. Достоинством емкостных датчиков является меньшая стоимость, чем у датчиков TDR и TDT, однако они более чувствительны к влиянию диэлектрической релаксации, проявляющейся в глинах и суглинках на частотах ниже 200–500 МГц, и проводимости.

При малых значениях ϵ'' способ измерения емкости не влияет на результат. Однако в случае высоких потерь многое зависит от способа измерения. Если емкость определяется через скорость нарастания напряжения, как в 5TE, то высокая сквозная проводимость, замедляющая скорость возрастания напряжения, будет приводить к завышенному измеряемым значениям ϵ' . В [38] отмечено, что возрастание УЭП почвы приводит к значительному возрастанию значений ϵ_a , измеряемых датчиками 5TE и 10HS. Установлено, что предельное значение удельной проводимости в этих датчиках равно 0.17–0.18 См/м. Попытка корректировки показаний с учетом температуры и проводимости предпринята авторами [31]. Удалось уменьшить погрешность измерений только для почв с УЭП не более 0.1 См/м. Следует заметить, что, хотя производитель и авторы многих работ считают, что эти датчики измеряют значения ϵ_a , определяемые, как и в методе TDR, по формулам (4) и (5), измеряемые значения не будут равны ϵ_a из-за разного механизма влияния ϵ'' на измерения.

В том случае, если емкость определяется по изменению частоты колебательного контура, рабочая частота зависит, в основном, от ДП (ϵ') почвы, то есть при разных значениях влажности измерения производятся на разных частотах. В работе [33] описан датчик, емкость которого образована стальными стержнями длиной 30 см и диаметром 0.32 см. При увеличении влажности почвы частота уменьшается от 45 до 15 МГц. Однако и при таком способе измерения емкости высокие значения мнимой части КДП ϵ'' почвы приводят к завышению измеряемых значений ϵ' по

причине уменьшения резонансной частоты колебательного контура, в котором есть потери энергии [20].

В ряде методов измеряется коэффициент отражения от датчика, погруженного в почву (Hydra Probe, частота 50 МГц [34], Theta Probe, частота 100 МГц [12]). Модуль коэффициента отражения связан с КДП следующим образом:

$$|r| = \left| \frac{1 - n^*}{1 + n^*} \right|.$$

В этом случае влияние диэлектрических потерь и УЭП на результат измерения еще больше. Поэтому калибровочная кривая, построенная для датчика Hydra Probe, работающего на частоте 50 МГц [34], отличается от приведенной в [36].

За несколько десятилетий применения этих датчиков опубликовано большое число работ. Отмечается, что заводские калибровки дают большую погрешность и требуются индивидуальные калибровки для почв, особенно с высоким содержанием глины [18] и органического вещества [12]. Во многих работах приведены результаты сравнения разных датчиков [25, 27, 30, 37], которые могут давать различные значения диэлектрической проницаемости при измерении одних и тех же образцов [37].

Как правило, емкостные датчики уступают по точности измерений датчикам TDR, однако в работе [37] приведены результаты, показывающие, что после проведения калибровок разных датчиков на конкретных почвах некоторые емкостные датчики обеспечивают меньшую погрешность измерения влажности, чем датчик TDR.

Результаты разных авторов во многом противоречивы. В опубликованных работах, как правило, не учитывают особенности методов измерения емкости. В итоге общепринятым подходом является определение калибровочных зависимостей не только для разных датчиков, но и для каждой конкретной почвы.

Нами исследованы широкополосные спектры КДП нескольких почв с разным содержанием физической глины и гумуса с целью установления влияния мнимой части КДП на результат измерения влажности с помощью диэлектрических датчиков. Для датчика Decagon 5TE, способного измерять УЭП на постоянном токе, найдена калибровочная зависимость, учитывающая измененные значения УЭП и справедливая для нескольких почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для исследований отобраны несколько образцов почв с разным содержанием физической глины и органического углерода. Названия почв и основные характеристики приведены в табл. 1.

Речной песок намыв из русла р. Иртыш в черте г. Омска. Образцы чернозема обыкновенного взяты на полях Омской области. Результаты рентгенофазового и ИК-спектроскопического анализов показали, что в образце 3 доминирует кварц ~55%, присутствуют полевые шпаты ~25%, остальное – слюда диоктаэдрическая, каолинит, смектит; в бентоните доминирует монтмориллонит – 70%, присутствуют кварц 15%, полевые шпаты 3–5%, кальцит + доломит 3–5%, остальные минералы имеют массовую долю по 1%.

В качестве образца с малым содержанием физической глины (образец 5 в табл. 1) использовали смесь речного песка и почвы 2. Гранулометрический состав почв определяли методом лазерной дифракции, речного песка и бентонита – по методу Качинского, содержание органического углерода – по методу Тюрина (по окисляемости хромовой смесью).

Методика измерений КДП представлена в [14], краткое изложение можно найти в [4]. Особенностью методики является то, что один и тот же образец почвы, помещенный в коаксиальную ячейку, измеряется в диапазоне частот от десятков герц до единиц гигагерц. Частотный диапазон ограничивается снизу влиянием электродной поляризации. Граничную частоту, на которой этим влиянием можно пренебречь, определяли путем измерения импеданса ячейки на низких частотах при разных значениях напряжения сигнала от 0.1 до 1 В. Поскольку электродная поляризация зависит от напряжения, отсутствие зависимости измеряемого импеданса от напряжения свидетельствует об отсутствии влияния электродной поляризации. Анализ результатов эксперимента показал, что при УЭП образца, равной 0.1 См/м (характерной для среднесоленной почвы), уже на частоте 10 кГц влияние электродной поляризации незначительно, сопоставимо с погрешностью измерений, а на частоте 50 кГц отсутствует полностью. При УЭП образца, равной 0.01 См/м, влияние электродной поляризации отсутствует на частотах выше 20 кГц.

Для измерений в частотном диапазоне ниже 5 МГц использовали измеритель LCR 3532-50 Hioki HiTESTER (Япония) и анализатор импедансов Keysight Technologies E4990A-10 (США). На частотах выше 1 МГц в разное время использовались векторные анализаторы параметров цепей Rohde & Schwarz (Германия) ZVRE (верхняя граничная частота 4 ГГц), ZNB8 (верхняя граница 8.5 ГГц) и ZNB20 (верхняя граница 20 ГГц). Погрешность измерения действительной и мнимой частей КДП для незасоленных почв на разных частотах изменялась от 0.2 до 4%. Температура образцов поддерживалась в климатической камере TH-ME-25 (Республика Корея) с точностью 0.3 К. Большинство измерений проведено при

Таблица 1. Названия и характеристики исследованных образцов почв

№	Название	Глубина отбора, см	С орг, %	Массовая доля частиц, %, размером, мм							Плотность почвы, г/см ³
				1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	<0.01	
1	Речной песок	–	0	0.14	93.8	4.40	1.15	0.4	0.1	1.65	1.42–1.59
2	Чернозем обыкновенный (гор. В2) Haplic Chernozem (Loamic)	60–70	0.52	4.56	0.05	48.70	15.52	22.77	8.41	45.7	1.62–1.86
3	Чернозем обыкновенный (гор. А _{пах}) Haplic Chernozem (Loamic)	0–10	3.94	5.30	0	37.89	19.92	29.47	7.42	56.6	1.26–1.47
4	Чернозем обыкновенный (гор. А _{пах}) Haplic Chernozem (Loamic)	0–10	4.12	8.43	0.02	29.39	19.96	32.57	9.63	61.4	1.07–1.33
5	Смесь образцов № 1 и 2 в пропорции 75/25	–	0.01	1.25	70.4	15.5	4.74	5.99	2.18	12.7	1.3–1.7
6	Бентонит	–	0	3.97	0	24.23	23.78	26.24	21.78	71.8	1.0–1.24

температуре 25°C. В статье данные о температуре образцов приведены только в тех случаях, когда она отличалась от 25°C.

Перед измерением почвенные образцы, находившиеся перед этим в воздушно-сухом состоянии, в достаточно большом объеме замачивались дистиллированной водой до полного капиллярного насыщения и выдерживались в течение 7 дней. Было установлено, что в почвах с высоким содержанием глины в течение этого времени происходит установление равновесных значений КДП [2]. Ранее было показано [5], что после добавления воды в высушенные образцы в течение нескольких суток происходит изменение прочности почв, капиллярно-сорбционного потенциала и электросопротивления на низких частотах. Эти свойства авторы объясняют существованием в почвах органо-минерального геля, который при высушивании разрушается, а после увлажнения медленно восстанавливается. На необходимость выдержки увлажненных почв в течение нескольких суток перед измерениями указано в работе [6].

Экспериментально было установлено, что значения КДП образцов одинаковой влажности, достигаемой при постепенном увлажнении и при высушивании, различаются. На зависимость гидрофизических свойств от предыстории образца указано в работе [10]. Явление гистерезиса КДП было изучено для речного песка и порошков кварцевых гранул разного размера [21]. Методом ядерного магнитного резонанса установлено, что при увлажнении вначале заполняются более

крупные поры, они же в первую очередь освобождаются от влаги при испарении. Поэтому при одной и той же влажности, достигаемой в разных процессах, заполненными оказываются поры разных размеров, то есть капли влаги будут иметь разную кривизну поверхности, что существенно образом сказывается на КДП.

Нами все измерения проводились только при постепенном высушивании замоченных ранее образцов. В естественных условиях, как правило, почвы в состоянии испарения почвенной влаги находятся большее время, чем в состоянии увлажнения. Как отмечено в [9], именно в состоянии иссушения рекомендуется проводить измерения гидрофизических свойств почв. От замоченного ранее и постепенно высыхающего образца отбиралась небольшая часть, тщательно перемешивалась, затем ею заполнялась измерительная ячейка, в которой почва выдерживалась перед измерениями еще в течение суток. Влажность и плотность почвы всех образцов после измерения КДП определялись термостатно-весовым методом как отношение масс воды и сухой почвы в образце к объему ячейки. Погрешность определения массы при использовании весов ВЛ-210 не превышала 0.7 мг. Повторных измерений с одинаковой влажностью выполнять не получается, так как при каждом следующем заполнении измерительной ячейки не удается выдерживать одинаковую плотность.

Часть измерений проведена при помощи емкостного датчика Decagon 5TE с регистратором

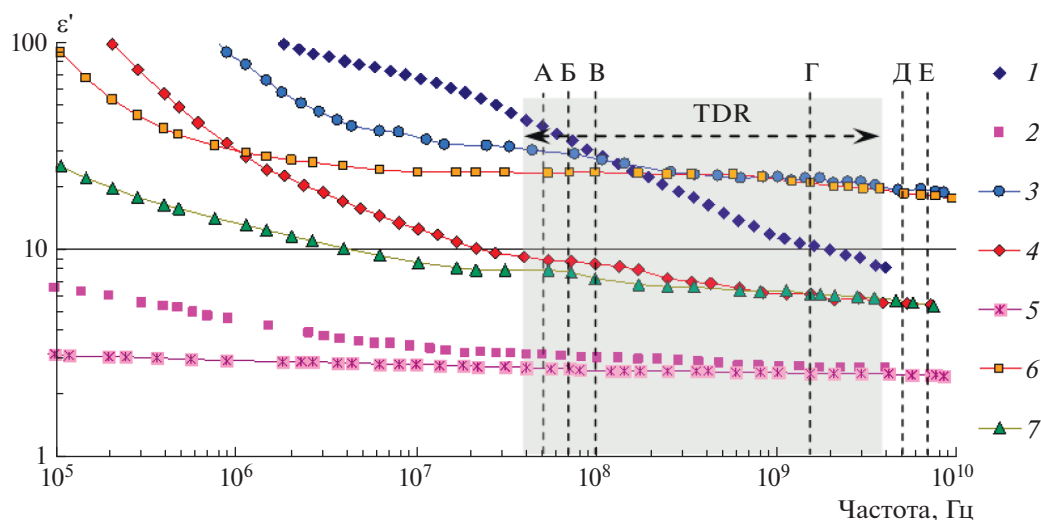


Рис. 1. Частотные зависимости действительной части КДП. Обозначения: 1, 2 – бентонит (образец 6 в табл. 1); 3, 4, 5 – чернозем (образец 3); 6, 7 – песок (образец 1). Влажность в $\text{м}^3/\text{м}^3$: 1 – 0.282; 2 – 0.002; 3 – 0.359; 4 – 0.108; 5 – 0.006; 6 – 0.351; 7 – 0.095. Штриховыми линиями указаны частоты, на которых работают измерители влажности: А – Hydra Probe (50 МГц); Б – 5TE, 10HS (70 МГц); В – Theta Probe (100 МГц); Г – SMOS (1.4 ГГц); В – Sentinel-1 (5 ГГц); Е – GCOM-1W (6.9 ГГц).

данных ProCheck. Образцы почв помещались в контейнер размерами $11 \times 11 \times 11 \text{ см}^3$. Датчик позволяет измерять значения диэлектрической проницаемости, которые по калибровочной зависимости, приведенной в [36], переводятся в значения влажности, выводимые на монитор ProCheck. Выше отмечалось, что при данном способе измерения мнимая часть КДП влияет на показания, однако измеряемые значения не равны “кажушейся” ДП, определяемой по формулам (4) и (5). Производителем указаны погрешность измерения объемной влажности $\pm 0.03 \text{ м}^3/\text{м}^3$ при использовании зависимости [36] и $\pm(0.01-0.02) \text{ м}^3/\text{м}^3$ при условии использования калибровочной зависимости, получаемой для каждой конкретной почвы. На монитор ProCheck также выводятся данные о температуре и УЭП в диапазоне от 0 до 2.7 См/м, однако точность измерений в 10% гарантируется лишь для проводимостей менее 0.7 См/м.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры КДП почв существенным образом зависят от содержания глины и гумуса. На рис. 1 приведены зависимости $\epsilon'(f)$ для образцов, практически не содержащих гумуса. Измерения всех образцов, кроме бентонита, выполнены при температуре 25°C . Сухой бентонит измерялся при температуре 105°C после шестичасовой выдержки при этой температуре. ДП сухой естественной почвы (объемная влажность 0.6%) очень слабо зависит от частоты, возрастая от 2.5 на частоте 8.5 ГГц до 3 на частоте 100 кГц. Скорее всего, это возрастание обусловлено малым содержанием

прочной связанной воды. ДП сухого бентонита изменяется от 2.6 на частоте 4 ГГц до 6.5 на частоте 100 кГц. При увеличении влажности ДП почв возрастает, но в диапазоне частот примерно от 0.5 до 2 ГГц от частоты почти не зависит. Исключением являются почвы с большой удельной поверхностью. В нашем случае это бентонит.

Зависимость от влажности в этом частотном диапазоне описывается разными моделями смесей. Наиболее часто используется рефракционная модель, в зарубежной литературе называемая Complex Refractive Index Model (CRIM). В этой модели КПП смеси является суммой объемных долей компонент смеси, умноженных на соответствующие значения КПП компонент [11].

В почве компонентами смеси является твердая фаза, связанная вода, свободная (капиллярная) вода и воздух. КДП твердой фазы и воздуха от частоты не зависят, а КДП связанной и объемной воды описываются релаксационной моделью Дебая. Частота релаксации свободной воды при температуре 25°C около 20 ГГц, а у связанной воды она в разных почвах может изменяться от 12 до 15 ГГц, поэтому на частотах 0.5–2 ГГц ДП этих компонент смеси может считаться равной статической ДП ϵ_s . Для объемной воды $\epsilon_s = 78.3$, для связанной воды ϵ_s изменяется от 22 до 65 в разных почвах [3].

На частотах ниже 0.5–1 ГГц на КДП почв влияет межслойная релаксация Максвелла–Вагнера, в результате которой возрастают действительная и мнимая части КДП. Релаксация Максвелла–Вагнера обусловлена поляризацией границ, разделяющих фазы с разными значениями ДП и УЭП.

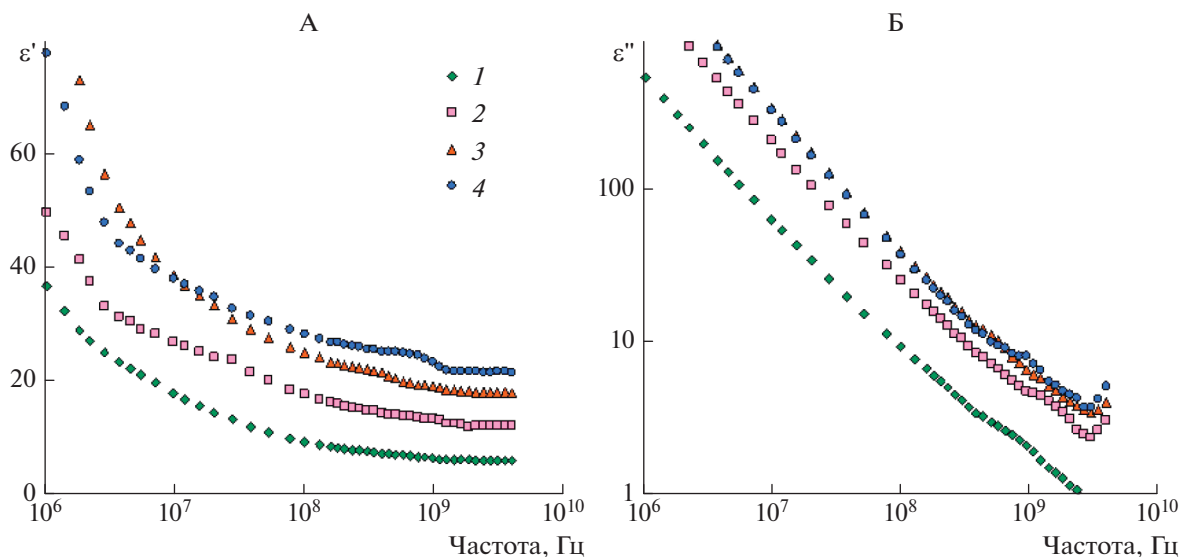


Рис. 2. Частотная зависимость действительной (А) и мнимой (Б) частей КДП чернозема (образец 2 в табл. 1). Влажность, $\text{м}^3/\text{м}^3$: 1 – 0.101; 2 – 0.217; 3 – 0.30; 4 – 0.371.

Модель этой релаксации разработана для плоско-слоистой структуры. Статическая ДП этой релаксации тем больше, а частота релаксации тем выше, чем меньше толщина слоев. В применении к почвам это означает, что чем меньше размеры частиц, тем сильнее и на более высоких частотах проявляется влияние этой релаксации. Анализ результатов, приведенных на рис. 1, позволяет сделать вывод, что с уменьшением частоты ДП наиболее резко возрастает в образцах с большим содержанием глины. Для песка при высокой влажности влияние релаксации Максвелла–Вагнера сказывается на частотах ниже 3–4 МГц, для суглинков на частотах ниже 100–200 МГц, а для бентонита это влияние проявляется даже на частотах в единицы гигагерц.

На частотах ниже 1–10 кГц во влажных породах сказывается влияние двойного электрического слоя, возникающего в электролите (почвенном растворе) вблизи поверхности твердой фазы, однако измерение ДП на этих частотах является непростой задачей из-за влияния электродной поляризации.

Обнаружено еще одно явление, приводящее к возрастанию ДП при уменьшении влажности пород [13]. На рис. 2 и 3 приведены частотные зависимости ДП разных образцов. При содержании влаги в количестве от 0.6 до 0.8 от полной капиллярной влагоемкости наблюдается еще один релаксационный процесс, проявляющийся в более резком возрастании ДП при уменьшении частоты ниже 20–30 МГц. При этом значения ДП могут быть даже больше, чем при более высокой влажности. Частота релаксации этого процесса зависит от размеров частиц. Особенно четко этот про-

цесс наблюдается в порошках кварцевых гранул почти сферической формы с небольшим разбросом размеров частиц. На рис. 3, Б приведены результаты измерения ДП порошка гранул со средним (по количеству) размером частиц 55 ± 12 мкм. Частота релаксации этого процесса при изменении влажности от 0.025 до 0.287 возрастает от 2.5 до 10 МГц. При этом его влияние на ДП проявляется вплоть до частот порядка 35 МГц. В речном песке основная доля частиц имеет размеры от 50 до 250 мкм (табл. 1), при этом частицы имеют неправильную форму. Частота релаксации составляет около 25 кГц, а влияние этого процесса на ДП наблюдается до частот 1–2 МГц.

Поскольку данный релаксационный процесс наблюдается только при наличии воздуха в отсутствие сквозной проводимости, его причиной могут быть либо поляризация границы вода–воздух, либо миграция ионов почвенного раствора в каплях почвенного раствора или в пленках воды на поверхности частиц. В работе [21] показано, что частота и интенсивность этого релаксационного процесса зависят не только от размеров частиц, но и от минерализации почвенного раствора.

В естественных почвах при большом разбросе размеров частиц влияние этого релаксационного процесса трудно отделить от влияния эффекта Максвелла–Вагнера, однако в отдельных случаях можно наблюдать возрастание ДП при уменьшении влажности на относительно низких частотах (рис. 4).

На основании представленных результатов можно сделать вывод о том, что для измерения влажности диэлектрическим методом нельзя использовать частоты ниже 20–30 МГц, так как за-

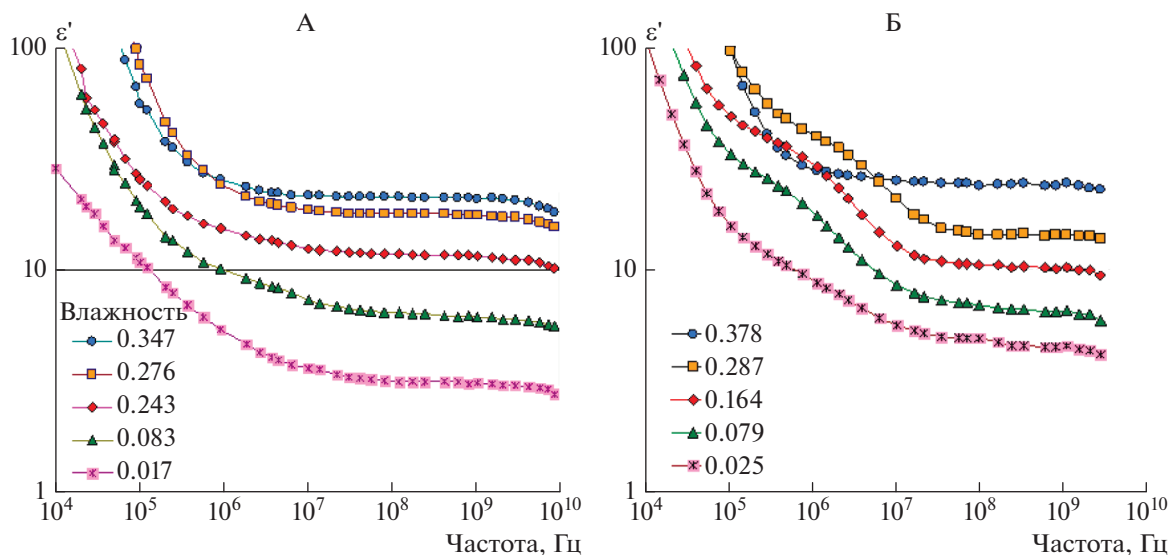


Рис. 3. Частотная зависимость ДП речного песка (образец 1) (А) и порошка кварцевых гранул (Б).

зависимость ϵ' от влажности не является монотонной. Кроме того, высокие значения имеет мнимая часть КДП, оказывающая значительное влияние на результат измерения в большинстве диэлектрических методов.

Как следует из данных, приведенных на рис. 1–4, в диапазоне от 0.3 до 1–3 ГГц частотная зависимость ДП (ϵ') выражена слабо, а мнимая часть КДП в диапазоне частот 2–4 ГГц имеет наименьшие значения. При измерении влажности методом TDR частотный спектр импульса, проходящего по линии, достаточно широк (рис. 1), однако время движения импульса определяется по приходу переднего фронта. Наиболее быстро распространяются высокочастотные составляющие спектра, поскольку на этих частотах показатель преломления меньше. Как показано в [19] “эффективная” частота в методе TDR при средней влажности составляет около 800 МГц.

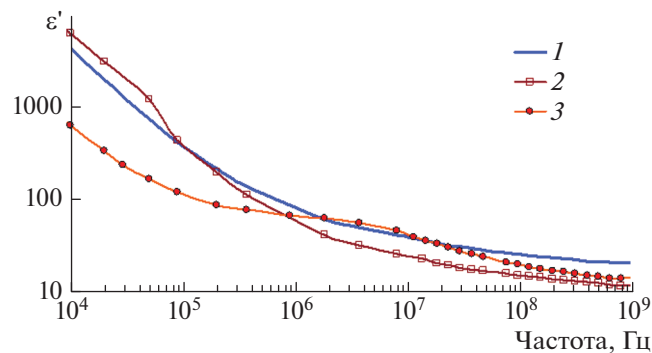


Рис. 4. Влияние поляризации границы вода–воздух на ДП. Обозначения: 1 – черноземы (образцы 2, 3 в табл. 1) при влажности $0.40 \text{ м}^3/\text{м}^3$; 2 – образец 3 при влажности $0.290 \text{ м}^3/\text{м}^3$; 3 – образец 2 при влажности $0.257 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

На рис. 5, А приведены измеренные зависимости показателя преломления трех почвенных образцов в зависимости от влажности на частоте 850 МГц. Зависимости аппроксимированы линейно-ломаными линиями, отражающими наличие в образцах двух форм воды с разными значениями КДП. Здесь же дана зависимость, приведенная в [36], пересчитанная из “кажущейся” диэлектрической проницаемости в показатель преломления:

$$n_T = \sqrt{\epsilon_a} = \sqrt{3.03 + 9.3W + 146W^2 - 76.7W^3}. \quad (6)$$

Лучше всего с этой зависимостью совпадает зависимость для образца 3, а кривая для образца 4, где больше содержится глины и гумуса, лежит ниже. В этой почве больше связанной воды, и за счет этого общая диэлектрическая проницаемость меньше даже при более высокой влажности. Кривая для песка лежит выше, так как связанной воды в нем нет. При небольшом количестве влаги она находится в менисковой форме, диэлектрическая проницаемость которой на этой частоте выше [1].

На рис. 5, Б приведены значения стандартного отклонения измеренных значений показателя преломления n_i для разных почв от значений n_T , рассчитываемых по формуле (6) при тех же значениях влажности. Отклонение рассчитывалось для значений объемной влажности в диапазоне от 0 до $0.4 \text{ м}^3/\text{м}^3$ по формуле:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (n_i - n_T)^2}{k - 1}}.$$

Здесь k – число измеренных значений показателя преломления при разных влажностях.

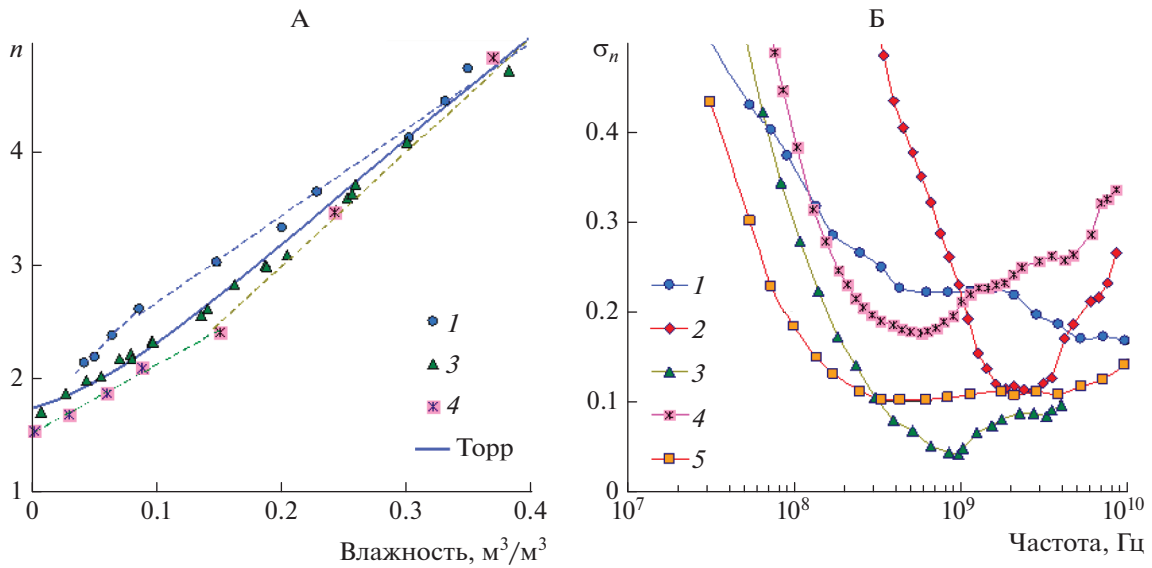


Рис. 5. Зависимости показателя преломления от влажности на частоте 850 МГц (А) и зависимость от частоты стандартного отклонения значений показателя преломления от зависимости, приведенной в [36] (Торп) (Б). Номера кривых совпадают с номерами образцов почв, приведенных в табл. 1.

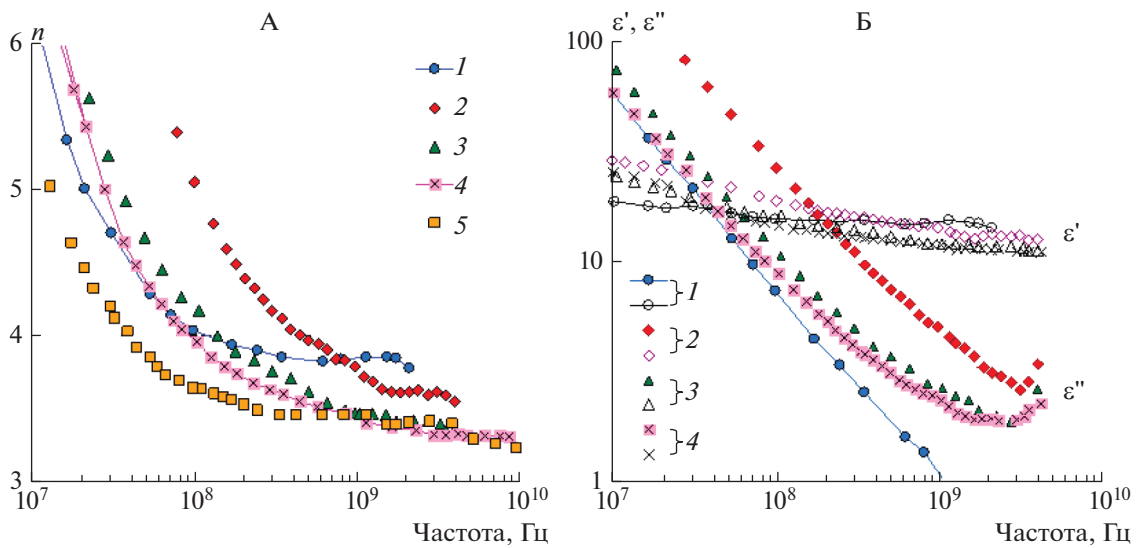


Рис. 6. Частотные зависимости показателя преломления (А) и КДП (Б). Номера кривых соответствуют номерам образцов в табл. 1.

В диапазоне частот от 300 МГц до 3 ГГц где сосредоточена основная часть энергии зондирующего импульса, стандартное отклонение показателя преломления не превышает 0.25. Это соответствует отклонению в значениях влажности, примерно равному 0.025. Для одной почвы (образец № 2) это отклонение резко возрастает на частотах ниже 1 ГГц. Как следует из данных, приведенных на рис. 6, А, показатель преломления почвы 2 значительно возрастает при уменьшении частоты ниже 1 ГГц. Эта почва отличается от дру-

гих тем, что при достаточно высоком содержании глины она практически не содержит гумуса. У этой почвы значения мнимой части КДП больше (рис. 6, Б), чем у других суглинков с высоким содержанием гумуса.

Понимание особенностей спектральных характеристик разных почв помогает интерпретировать результаты измерений емкостными датчиками. На рис. 7, А приведено сравнение показаний датчика 5TE с результатом измерения влажности термостатно-весовым способом для

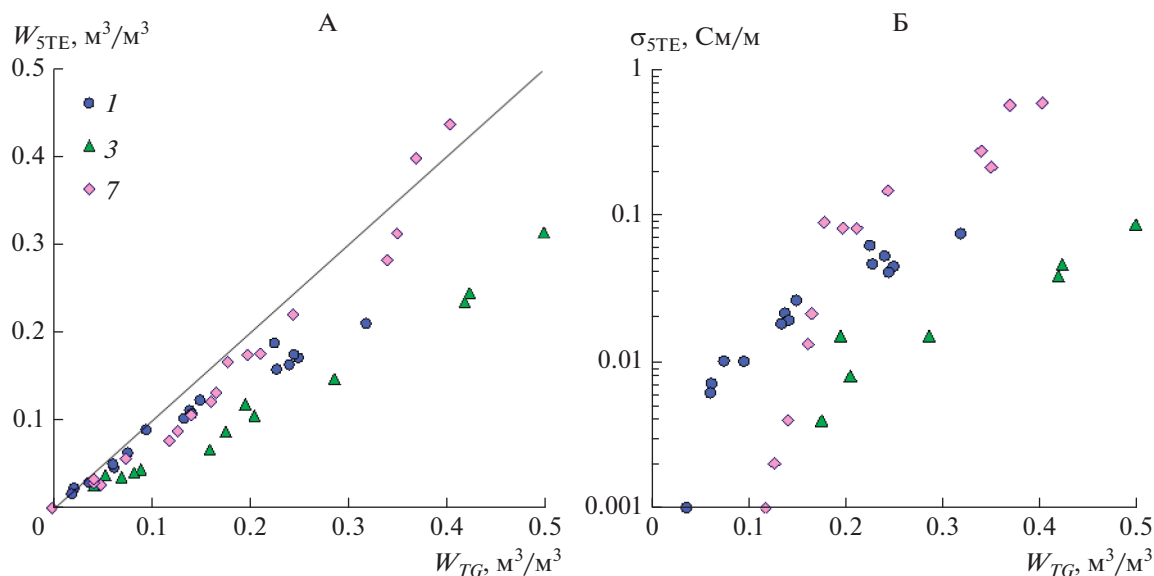


Рис. 7. Связь измеренных датчиком 5ТЕ значений влажности (А) и проводимости (Б) с влажностью W_{TG} , измеренной термостатно-весовым способом. 1 – образец 1; 3 – образец 3; 7 – засоленный образец 3.

трех образцов с разной УЭП. Для увеличения УЭП в сухой образец № 3 добавлена сухая соль NaCl в количестве 1% от массы почвы.

При использовании заводской калибровки для минеральных почв значения влажности, измеренные датчиком при температуре 23–24°C, оказываются ниже значений, измеренных термостатно-весовым способом. Подобная особенность датчика 5ТЕ отмечена в некоторых публикациях, например в [31]. Из данных, приведенных на рис. 7, Б, видно, что УЭП очень быстро возрастает при увеличении влажности.

Из анализа литературных данных следует, что для каждой почвы необходимо применять индивидуальную калибровочную зависимость. Для датчика 5ТЕ использовали зависимость для перевода показаний датчика W_{5TE} в показатели, близкие к значениям, измеренным термостатно-весовым способом:

$$W_{5TEcorr} = AW_{5TE}^2 + BW_{5TE} + C. \quad (7)$$

Значения коэффициентов полинома (7) подбирали таким образом, чтобы невязка между скорректированными значениями влажности $W_{5TEcorr}$ и значениями W_{TG} , измеренными термостатно-весовым способом, была минимальной.

Подобранные таким образом индивидуально для каждой из трех почв значения коэффициентов полинома приведены в табл. 2. Соотношения между $W_{5TEcorr}$ и W_{TG} приведены на рис. 8, А. Стандартное отклонение для всех измеренных значений при этом составило 0.014 м³/м³, что соответствует паспортной погрешности измерений в случае применения индивидуальных калибровочных зависимостей.

Как было показано, значения “кажущейся” ДП зависят от мнимой части КДП ϵ'' . Поскольку датчик 5ТЕ измеряет УЭП, вносящую значительный вклад в ϵ'' , логично выполнить попытку использования этих значений для получения калибровочной зависимости, справедливой для нескольких почв. Поскольку проводимость резко возрастает при увеличении влажности, для компенсации возрастания показаний датчика при увеличении УЭП использовали логарифмическую зависимость:

$$W_{5TEcorr} = A(\ln(B\sigma + 0.001))W_{5TE}^2 + C(\ln(\sigma + 0.001))W_{5TE}, \quad (8)$$

где значения σ приведены в См/м.

Таблица 2. Значения коэффициентов калибровочных зависимостей (7) и (8)

Калибровочная зависимость	Коэффициенты полиномов		
	A	B	C
Уравнение (7) для почвы № 1	–0.508	1.583	–0.0184
Уравнение (7) для почвы № 3	–2.034	2.273	–0.0110
Уравнение (7) для засоленной почвы № 3	–1.019	1.366	0.00464
Уравнение (8) для трех почв	–1.206	0.372	–0.192

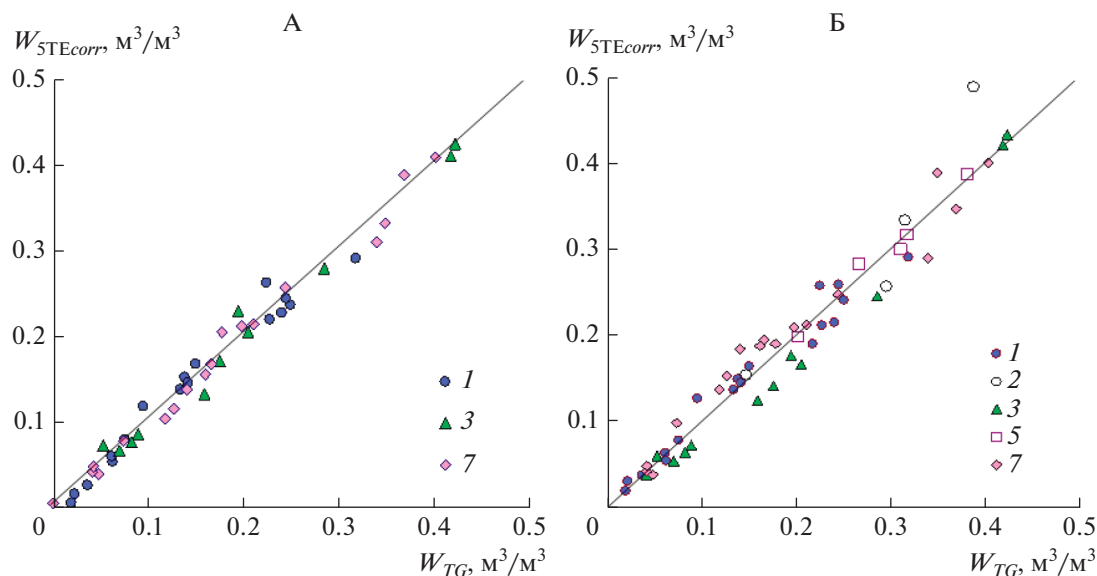


Рис. 8. Результат корректировки данных 5ТЕ по индивидуальным калибровочным зависимостям (А) и по найденной для трех почв калибровочной зависимости (Б): 1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 5 – образец 5; 7 – засоленный образец 3.

Подобранные с целью минимизации невязки между $W_{5TEcorr}$ и W_{TG} трех почв значения коэффициентов A , B и C , также приведены в табл. 2. Соотношения между $W_{5TEcorr}$ и W_{TG} для этого случая показаны на рис. 8, Б. Стандартное отклонение для этих измеренных значений при этом составило $0.035 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Были проведены дополнительно измерения влажности двух других почв (№ 2 и 5), результаты которых не входили в выборку для определения коэффициентов уравнения (8). Как показано на рис. 8, Б, при влажности менее $0.35 \text{ м}^3/\text{м}^3$ полученные значения $W_{5TEcorr}$ отклоняются от W_{TG} на величину не более $0.035 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены физические принципы, на которых основано измерение влажности диэлектрическим методом. На результат измерения влажности такими датчиками сильное влияние оказывает мнимая часть КДП, определяемая диэлектрическими потерями и ионной проводимостью. Степень этого влияния различна в разных методах измерения влажности. Однозначно установить зависимость показаний датчиков от мнимой части КДП можно только в методах TDR и TDT, где измеряется действительная часть показателя преломления, и в методах, основанных на измерении коэффициента отражения (Hydro Probe, Theta Probe), который зависит от комплексного показателя преломления. В других датчиках такую зависимость установить сложно, поэтому для каждого типа датчика и для каждой почвы требуется уста-

навливать индивидуальную калибровочную зависимость. Калибровочные зависимости, предлагаемые производителями, как правило, дают высокую погрешность.

Диэлектрические измерения проводили в процессе высушивания почвы, предварительно замоченной до полного капиллярного насыщения и выдержанной в течение семи дней. Дано обоснование такой подготовки образцов. Проведенные лабораторные измерения спектров КДП почв с разным содержанием физической глины и гумуса показали, что диапазон частот ниже 20–30 МГц непригоден для измерения влажности диэлектрическим методом из-за сильного влияния процессов диэлектрической релаксации и высоких значений мнимой части КДП. Для измерения влажности лучше всего использовать диапазон частот 0.5–3 ГГц, где частотная зависимость действительной КДП проявляется слабо, а мнимая часть имеет минимальные значения.

Проведена серия лабораторных измерений влажности почв емкостным датчиком Decagon 5TE. При использовании встроенной калибровочной зависимости получаемые значения влажности ниже измеренных термостатно-весовым способом, причем наблюдается существенное различие для разных почв. Датчик 5TE измеряет также УЭП, что позволяет использовать эти значения для построения калибровочной зависимости, общей для разных почв с УЭП от 0 до 0.5–0.6 См/м. При этом погрешность измерения в диапазоне влажностей от 0 до $0.35 \text{ м}^3/\text{м}^3$ составила $0.035 \text{ м}^3/\text{м}^3$, что только в 2.5 раза выше, чем при измерениях с ис-

пользованием индивидуальных калибровочных зависимостей для каждой из исследованных почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляева Т.А., Бобров П.П., Кондратьева О.В., Репин А.В.* Диэлектрические свойства капиллярно-менисковой почвенной влаги // Исследование Земли из космоса. 2011. № 3. С. 55–64.
2. *Бобров П.П., Кондратьева О.В.* Медленные изменения диэлектрической проницаемости почв после увлажнения из сухого состояния // Мат-лы XII Международной конф. “Физика диэлектриков” (Диэлектрики – 2011). СПб, 23–26 мая 2011 г. Т. 1. С. 204–206.
3. *Бобров П.П., Миронов В.Л., Ивченко О.А., Красноухова В.Н.* Спектроскопическая модель диэлектрической проницаемости почв, использующая стандартизованные агрофизические показатели // Исследование Земли из космоса. 2008. № 1. С. 15–23.
4. *Бобров П.П., Миронов В.Л., Репин А.В.* Спектры диэлектрической проницаемости нефтеводонасыщенных песчано-глинистых пород различного минералогического состава и релаксационные свойства воды в этих породах // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 7. С. 1359–1368. doi 10.1016/j.rgg.2015.06.007
5. *Федотов Г.Н., Третьяков Ю.Д., Поздняков А.И., Жуков Д.В.* Роль органо-минерального геля в формировании удельного электросопротивления почв: концепция и эксперименты // Почвоведение. 2005. № 5. С. 556–564.
6. *Федотов Г.Н., Шоба С.А., Поздняков А.И., Пузанова А.Е.* Структурный переход в гумусовой матрице почвенных гелей и его влияние на свойства почв // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1056–1067. doi 10.7868/S0032180X14090032
7. *Хинпель А.Р.* Диэлектрики и волны. М.: ИЛ, 1960. 440 с.
8. *Чудинова С.М.* Диэлектрические показатели почвы и категории почвенной влаги // Почвоведение. 2009. № 4. С. 441–451.
9. *Шеин Е.В.* Гидрология почв: этапы развития, современные тенденции, ближайшие перспективы // Почвоведение. 2010. № 2. С. 175–185.
10. *Bhat A.M., Rao B.H., Singh D.N.* A generalized relationship for estimating dielectric constant of soils // J. ASTM Int. 2007. V. 4. № 7. P. 1–17. doi 10.1520/JAI100595
11. *Birchak J.R., Gardner C.G., Hipp J.E., Victor J.M.* High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture // Proc. IEEE. 1974. V. 62. № 1. P. 93–98.
12. *Bircher S.M., Andreasen M., Vuollet J., Vehviläinen J., Rautiainen K., Jonard F., Weihermüller L., Zakharova E., Wigneron J.-P., Kerr Y.H.* Soil moisture sensor calibration for organic soil surface layers // Geosci. Instrum. Method Data Syst. 2016. V. 5. № 1. P. 109–125. doi 10.5194/gi-5-109-2016
13. *Bobrov P.P., Lapina A.S., Repin A.V.* Effect of the rock/water/air interaction on the complex dielectric permittivity and electromagnetic waves attenuation in water-saturated sandstones // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) Proceedings. Prague, July 6–9, 2015. P. 1877–1879.
14. *Bobrov P.P., Repin A.V., Rodionova O.V.* Wideband Frequency Domain Method of Soil Dielectric Properties Measurements // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2015. V. 53. № 5. P. 2366–2372. doi 10.1109/TGRS.2014.2359092
15. *Bogena H.R., Huisman J.A., Schilling B., Weuthen A., Vereecken H.* Effective Calibration of Low-Cost Soil Water Content Sensors // Sensors. 2017. V. 17. № 1. P. 1–12. doi 10.3390/s17010208
16. *Chung C.-C., Lin C.-P.* Apparent dielectric constant and effective frequency of TDR measurements: influencing factors and comparison // Vadose Zone J. 2009. V. 8. P. 548–556.
17. CS616 and CS625 Water Content Reflectometers. Revision: 2/16 URL: <https://s.campbellsci.com/documents/af/manuals/cs616.pdf>. Дата доступа 01.03.2018.
18. *Ganjegunte G.K., Sheng Z., Clark J.A.* Evaluating the accuracy of soil water sensors for irrigation scheduling to conserve freshwater // Appl. Water Sci. 2012. V. 2. № 2. P. 119–125. <https://doi.org/10.1007/s13201-012-0032-7>
19. *Kelleners T.J., Robinson D., 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. V. 69. № 1. P. 67–76.
20. *Kelleners T.J., Soppe R.W.O., Robinson D.A., Schaap M.G., Ayars J.E., Skaggs T. H.* Calibration of capacitance probe sensors using electric circuit theory // Soil Sci. Soc. Am. J. 2004. V. 68. № 2. P. 430–439.
21. *Lapina A.S., Bobrov P.P., Golikov N.A., Repin A.V., Shumskayte M.Y.* Hysteresis of the NMR response and the complex relative permittivity of the quartz granules powders and solid sandstones during the water imbibition and drainage // Measurement Science and Technology. 2017. V. 28. 014007. doi 10.1088/1361-6501/28/1/014007
22. *Lekshmi S.S.U., Singh D.N., Baghinic M.S.* A critical review of soil moisture measurement // Measurement. 2014. V. 54. P. 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
23. *Lin C.-P.* Frequency domain versus travel time analyses of TDR waveforms for soil moisture measurements // Soil Sci. Soc. Am. J. 2003. V. 67. № 3. P. 720–729.
24. *Mattei E., Di Matteo A., De Santis A., Pettinelli E.* Role of dispersive effects in determining probe and electromagnetic parameters by time domain reflectometry // Water Resour. Res. 2006. V. 42. W08408.
25. *Mittelbach H., Lehner I., Seneviratne S.I.* Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland // J. Hydrology. 2012. V. 430–431. P. 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.041>
26. *Qu W., Bogena H.R., Huisman J.A., Vereecken H.* Calibration of a novel low-cost soil water content sensor based on a ring oscillator // Vadose Zone J. 2013. V. 12. № 2. P. 1–10. <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0139>
27. *Rao B.H., Singh D.N.* Moisture content determination by TDR and capacitance techniques: a comparative study // Int. J. Earth Sciences and Engineering. 2011. V. 4. № 6. P. 132–137.
28. *Robinson D.A., Campbell C.S., Hopmans J.W. et al.* Soil moisture measurement for ecological and hydrological

- watershed-scale observatories: A review // *Vadose Zone J.* 2008. V. 7. № 1. P. 358–389.
29. *Robinson D.A., Jones S.B., Wraith J.M. et al.* A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry // *Vadose Zone J.* 2003. № 2. P. 444–475.
 30. *Rosenbaum U., Huisman J.A., Weuthen A., Vereecken H., Bogaen H.R.* Sensor-to-Sensor Variability of the ECH2O EC-5, TE, and 5TE Sensors in Dielectric Liquids // *Vadose Zone J.* 2010. V. 9. № 1. P. 181–186. doi 10.2136/vzj2009.0036
 31. *Rosenbaum U., Huisman J.A., Vrba J., Vereecken H., Bogaen H.R.* Correction of temperature and electrical conductivity effects on dielectric permittivity measurements with ECH₂O sensors // *Vadose Zone J.* 2011. V. 10. № 2. P. 582–593. doi 10.2136/vzj2010.0083
 32. *Santi E., Paloscia S., Pettinato S., Entekhabi D., Alemohammad S.H., Konings A. G.* Integration of passive and active microwave data from SMAP, AMSR2 and Sentinel-1 for Soil Moisture monitoring // *Proc. of IGARSS'16, Beijing, China.* 2016. P. 5252–5255. doi 10.1109/IGARSS.2016.7730368
 33. *Seyfried M.S., Murdock M.D.* Response of a New Soil Water Sensor to Variable Soil, Water Content, and Temperature // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2001. V. 65. № 1. P. 28–34.
 34. *Seyfried M.S., Murdock M.D.* Measurement of Soil Water Content with a 50-MHz Soil Dielectric Sensor // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2004. V. 68. № 2. P. 394–403.
 35. *Topp G.C., Zeldin S., White I.* Impact of real and imaginary components of relative permittivity on time domain reflectometry measurements in soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2000. V. 64. № 4. P. 1244–1232.
 36. *Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.* Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines // *Water Resour. Res.* 1980. V. 16. № 3. P. 574–582.
 37. *Vaz C.M.P., Jones S., Meding M., Tuller M.* Evaluation of standard calibration functions for eight electromagnetic soil moisture sensors // *Vadose Zone J.* 2013. V. 12. № 2. P. 1–16. doi 10.2136/vzj2012.0160
 38. *Viscontia F., Miguel de Paza J., Martínez D., Molinab M.* Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon 10HS and 5TE for estimating the water content of irrigated soils // *Agricultural Water Management.* 2014. V. 132. P. 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.10.005>
 39. *Wigneron J.-P., Jackson T.J., O'Neill P. et al.* Modelling the passive microwave signature from land surfaces: A review of recent results and application to the L-band SMOS & SMAP soil moisture retrieval algorithms // *Remote Sensing of Environment.* 2017. V. 192. P. 238–262. doi 10.1016/j.rse.2017.01.024
 40. *Will B., Rolfes I.* Comparative study of moisture measurements by time domain transmissometry // *SENSORS, 2013 IEEE.* doi 10.1109/ICSENS.2013.6688529 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6688529/>. Дата доступа 19.10.2017.

Soil Moisture Measurement by the Dielectric Method

P. P. Bobrov^{a,*}, T. A. Belyaeva^a, E. S. Kroshka^a, and O. V. Rodionova^a

^a*Omsk State Pedagogical University, 14, Tukhachevskogo Emb., Omsk, 644099, Russia*

^{*}*e-mail: bobrov@omgpu.ru*

Measuring soil moisture by the dielectric methods is considered. It was revealed that the complex dielectric permeability (CDP) affects the readings of sensors using different physical principles in different ways. The results of CDP measurements for six samples are given: river sand, bentonite, three samples of Haplic Chernozem (Loamic) of the Omsk region and a mixture of chernozemic material and river sand. Content of particles less than 0.01 mm in size in the samples varied from 1.7 to 72%, the content of organic carbon ranged from 0 to 4.12%. Measurements of CDP were performed at different values of moisture at the frequencies from 10 kHz to 4–8 GHz in the same cell by using the original technique developed by authors. It was noted that at frequencies below 20–30 MHz, the dielectric permittivity is an ambiguous function of moisture owing to the strong influence of the conductivity of the soil solution and of interlayer dielectric relaxation on it. Moisture measurements are best to perform in the frequency range 0.5–3 GHz, where the effect of interlayer relaxation and soil solution conductivity on the CDP is negligible. Measurements of soil moisture and conductivity were performed using a Decagon 5TE capacitive sensor. The calibration dependence that is valid for different soils, considering the conductivity of the soil measured by this sensor was found. The error of moisture measurements using this dependence is 0.035 m³/m³. The use of individual calibration dependencies for each of soils reduces the error to 0.014 m³/m³. Results of the work can be used to increase the accuracy of soil moisture measurement by the dielectric method.

Keywords: soil dielectric permittivity, specific electric conductivity, optimum frequency range, Chernozem