

Зависимость диэлектрической проницаемости связанной воды в бентоните от влажности и температуры

Т.А. Беляева¹, П.П. Бобров¹, В.Л. Миронов², О.В. Родионова¹

¹ Омский государственный педагогический университет, Омск, Россия
E-mail: tabel.omgpi@mail.ru

² Институт физики им. Л.В.Куренского СО РАН, Красноярск, Россия
E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

Приведены результаты измерения комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) бентонита в зависимости от влажности и температуры на частотах от 10 кГц до 8,5 ГГц. С использованием рефракционной модели смеси исследованы диэлектрические свойства связанной воды. Показано, что КДП связанной воды зависит от ее количества, причем эта зависимость не является монотонной. Действительная и мнимая части КДП достигают максимальных значений при влажностях 0,03–0,04 м³/м³ и возрастают при повышении температуры. Создана модель зависимости КДП связанной воды от частоты, температуры и влажности, включающая три частотные области релаксации. Найдены регрессионные уравнения, связывающие параметры модели с температурой и влажностью. Результаты расчетов КДП бентонита с использованием этой модели отклоняются от экспериментальных данных по действительной части КДП не более, чем на 10%, а по мнимой – на 15–20%.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, связанная вода, бентонит, диэлектрическая релаксация, рефракционная модель.

Введение

Сведения о частотной зависимости диэлектрической проницаемости $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$ (КДП) влажных почв необходимы в микроволновом зондировании. Существенное влияние на КДП почв оказывает связанная вода. Однако в большинстве работ по изучению диэлектрических характеристик глинистых почв диэлектрические свойства связанной воды отдельно не исследуются (Ishida et al., 2000; Kelleners et al., 2005). Такая работа в свое время была проведена авторами работ (Боярский и др., 1995; Boyarskii et al., 2002). В этих работах для расчета КДП связанной воды использовалась модель Дебая. Параметры этой модели отличаются от параметров свободной воды лишь временем релаксации, которое зависит от количества воды. Фактически, таким образом учитывается лишь ориентационная поляризация молекул связанной воды. В рефракционных моделях, приведенных в (Миронов et al., 2004; Беляева и др., 2003; Бобров и др., 2008) при моделировании КДП связанной воды также учитывается только ориентационная поляризация молекул, поэтому все эти модели дают хорошее согласие с измеренными значениями КДП почв, содержащих глину, лишь на частотах выше 1–1,5 ГГц.

На низких частотах наблюдается резкое возрастание значений КДП почв, как ϵ' так и ϵ'' . Причиной возрастания является межповерхностная поляризация на границе вода-твердая фаза. При не очень высокой влажности, когда вся почвенная вода находится в связанной форме, возрастание КДП почв в рамках диэлектрической модели смеси, состоящей

из связанной воды, твердых частиц и воздуха, можно описать возрастанием КДП связанной воды. Учет межповерхностной поляризации позволил создать модель, удовлетворительно совпадающую с экспериментом в диапазоне частот 0,04–26,5 ГГц (Mironov et al., 2013). В диэлектрических моделях авторов предполагалось, что КДП связанной воды на фиксированной частоте остается неизменной при увеличении объемной доли воды в породе от нуля до максимального ее значения. В применении к суглинистым почвам с максимальной долей связанной воды не выше 0,1–0,15 это не приводило к большим расхождениям с экспериментом.

Первые экспериментальные исследования, показавшие зависимость КДП связанной воды от ее количества, были проведены с использованием не очень точной аппаратуры и на частотах от 0,3 до 10 ГГц (Беляева и др., 2006). В работе (Беляева и др., 2013) приведены результаты измерений в частотном диапазоне от 1 МГц до 4 ГГц с использованием векторных анализаторов цепей ZVRE и ZNB8 фирмы Роде и Шварц по методике, изложенной в (Бобров и др., 2012). При этом во всем диапазоне частот измерялся один и тот же образец, помещенный в коаксиальную ячейку. Показано, что КДП связанной воды в бентоните и лугово-черноземной почве при возрастании влажности слабо уменьшается практически во всем исследованном частотном диапазоне.

Ниже приведены результаты измерения КДП бентонита, объемная доля связанной воды в котором может достигать значений 0,2–0,22, в диапазоне частот 10 кГц – 8,5 ГГц и с малым шагом изменения влажности. Особое внимание было уделено исследованиям КДП бентонита при малых влажностях и изменению диэлектрических свойств связанной воды при изменении ее объемной доли от 0,015 до 0,2 и температуры образцов от –18 до +45°C.

Зависимость КДП бентонита от влажности и температуры

Применяемые измерительные приборы: измеритель LCR 3532-50 фирмы НЮКИ и векторный анализатор цепей ZNB8 – имеют низкую погрешность измерения в широком диапазоне частот, поэтому погрешность измерения КДП почв, рассчитанная по паспортным данным приборов, составляла 0,4–2% для действительной части КДП и 0,5–3% – для мнимой части во всем частотном диапазоне.

При экспериментальных измерениях обнаружено, что при малых влажностях (доля воды менее 0,06–0,07), когда воды, находящейся в породе, недостаточно для образования сплошной пленки на поверхности твердых частиц, комплексный показатель преломления бентонита:

$$n_s^* = n_s - ik_s = \sqrt{\epsilon_s^*}$$

растет с возрастанием влажности быстрее, чем в диапазоне влажностей от 0,07 до 0,2 (рис. 1). При объемной доле, приблизительно равной 0,06, вода образует на поверхности минеральных частиц пленку в один мономолекулярный слой. При дальнейшем увеличении влажности возрастание действительной и мнимой частей показателя преломления замедляется. Таким образом, можно сделать вывод о том, что при возникновении на поверхности частиц сплошных пленок связанной воды происходит резкое изменение ее наклонов зависимостей $n_s(W)$ и $k_s(W)$.

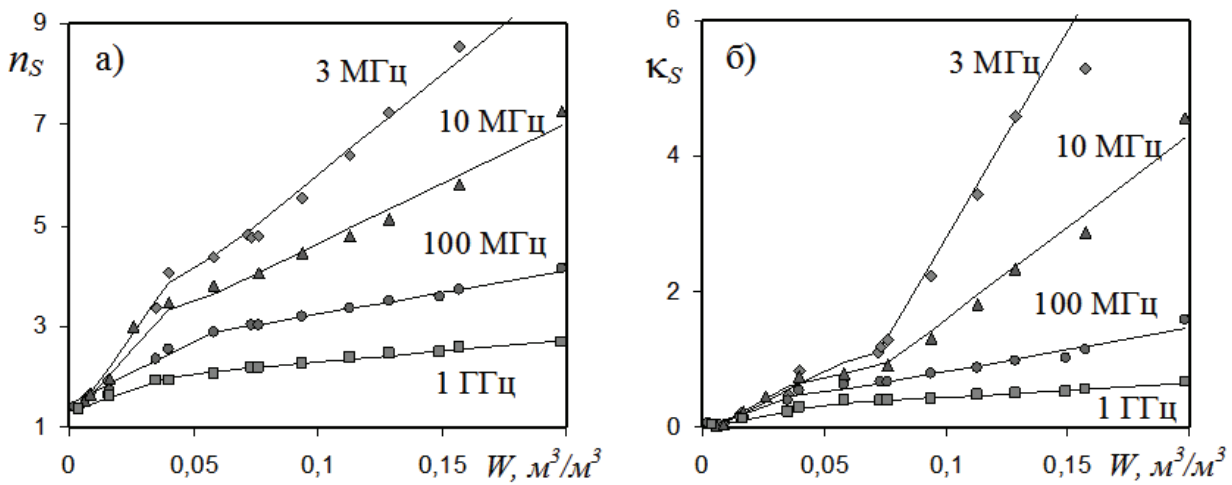


Рис. 1. Аппроксимированные зависимости действительной n_s (а) и мнимой k_s (б) частей показателя преломления бентонита от объемной влажности при температуре 25 °С

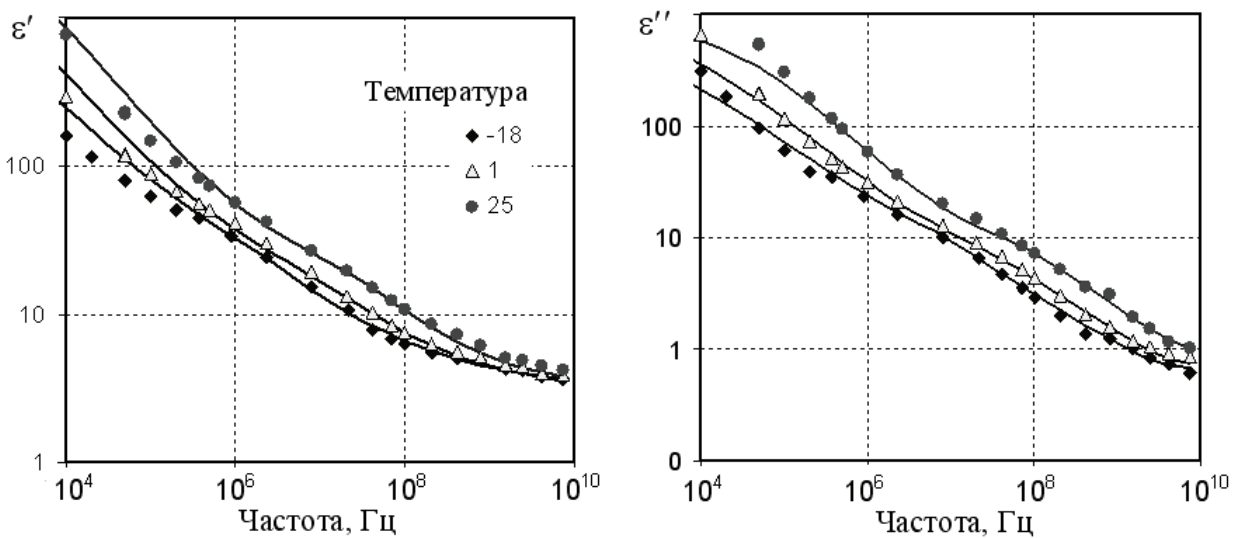


Рис. 2. Частотные зависимости КДП бентонита с объемной долей воды 0,074 при разных температурах

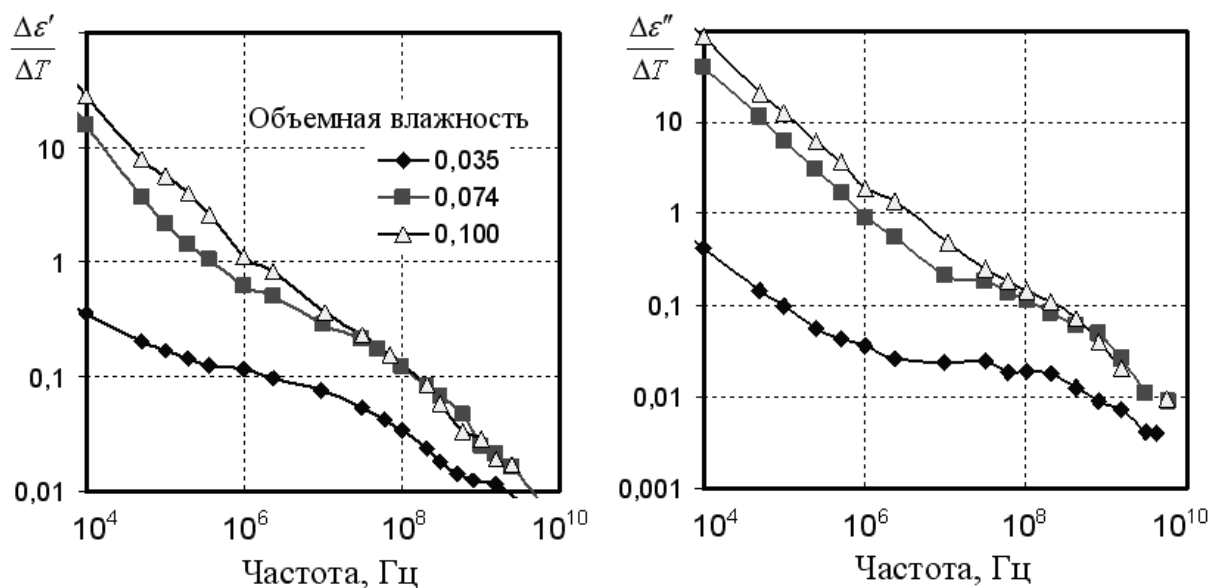


Рис. 3. Частотная зависимость температурных коэффициентов действительной и мнимой частей КДП бентонита при разных влажностях

Экспериментально исследованы температурные зависимости КДП бентонита в диапазоне температур от $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ при значениях объёмной доли воды 0,016; 0,074; 0,088; 0,100. Частотные зависимости действительной и мнимой частей КДП бентонита при объёмной доле воды 0,074 при трех температурах приведены на рис. 2. Маркерами отмечены экспериментальные значения, линиями – результаты расчётов с использованием модели, приведенной ниже. Экспериментальные температурные зависимости действительной и мнимой частей КДП бентонита в диапазоне частот от 1 МГц до 1 ГГц и интервале температур от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ являются линейными, поэтому температурный коэффициент действительной и мнимой частей КДП не зависит от температуры, но зависит от частоты. Частотные зависимости температурных коэффициентов КДП для образцов разной влажности приведены на рис. 3. Из данных приведенных на этих рисунках видно, что наиболее сильно температурная зависимость КДП проявляется на низких частотах, причем в диапазоне малых влажностей она слабее (на частоте 1 МГц на порядок), чем при влажностях, превышающих значение $0,07\text{ м}^3/\text{м}^3$.

Модель КДП бентонита

Для исследования диэлектрических свойств связанной воды в бентоните использовалась рефракционная модель смеси (Mironov et al., 2013). В применении к смеси, содержащей твердую фазу, воздух и связанную воду комплексный показатель преломления бентонита можно представить в виде:

$$n_s = n_d + (n_b - 1) M\rho, \quad (1)$$

$$\kappa_s = \kappa_d + \kappa_b M\rho, \quad (2)$$

где n_d , κ_d , n_b , κ_b – показатели преломления и поглощения сухого бентонита и связанной воды, соответственно; ρ – отношение плотности сухого сложения бентонита к плотности воды; M – влажность бентонита (массовая доля), связанная с объемной влажностью соотношением $W = M \cdot \rho$. Параметры n_d и κ_d считались частотно-независимыми. Из экспериментальных измерений КДП бентонита найдена связь последних двух параметров с плотностью сухого сложения: $n_d = 1 + 0,423 \cdot \rho$, и $\kappa_d = 0,02 \cdot \rho$. Исследование зависимости параметров n_b , и κ_b от частоты, влажности, температуры и, возможно, от плотности явилось целью настоящей работы.

Если имеются экспериментально измеренные спектры комплексного показателя преломления бентонита, то с помощью (1) и (2) можно найти спектры комплексного показателя преломления и КДП связанной воды. При возрастании объемной доли воды в образце будут существовать группы молекул воды, находящиеся в разной степени связи с поверхностью почвенных частиц и обладающие разной степенью "участия" в поляризационных процессах. Найденные из (1) и (2) значения диэлектрической проницаемости связанной воды будут являться некими "эффективными" значениями, описывающими свойства всего объема воды в целом.

Модель КДП связанной воды при 25° С

Частотная зависимость комплексного показателя преломления связанной воды

$$n_b^* = \sqrt{\varepsilon_b^*} = \sqrt{\varepsilon_b' - i\varepsilon_b''}$$

рассчитывалась по модели (Беляева и др., 2013), в которой частотная зависимость описывалась релаксационными моделями Дебая и Коула-Коула:

$$\varepsilon_b^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{S1} - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau_1} + \frac{\Delta\varepsilon_{S2}}{(1 + i\omega\tau_2)^{1+\alpha_2}} + \frac{\Delta\varepsilon_{S3}}{(1 + i\omega\tau_3)^{1-\alpha_3}}. \quad (3)$$

Здесь ε_∞ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость, значение которой принималось равным 4,9; ε_{S1} – низкочастотная диэлектрическая проницаемость 1-й (начиная с высокочастотного края диапазона) области релаксации; $\Delta\varepsilon_{S2}$, $\Delta\varepsilon_{S3}$ – разности между низкочастотным и высокочастотным пределами диэлектрической проницаемости 2-й и 3-й областей релаксации, соответственно; τ_1 , τ_2 , τ_3 – времена релаксации для 1, 2, 3-й областей релаксации, соответственно; α_2 , α_3 – коэффициенты распределения времён релаксации для 2-й и 3-й областей; ω – циклическая частота, i – мнимая единица.

Параметры модели (3) подбирались таким образом, чтобы невязка между расчетными по формулам (1) и (2) значениями n_S и κ_S бентонита и измеренными экспериментально значениями была бы минимальной.

Параметры первой области релаксации, описывающей ориентационную поляризацию, принимались неизменными во всех случаях и равными $\varepsilon_{S1}=30$; $\tau_1=12,5$ пс, так как в бентоните, имеющем большую удельную поверхность, межповерхностная поляризация превалирует над ориентационной вплоть до частот ~ 10 ГГц. Параметры для 2-й и 3-й областей релаксации зависят от влажности и температуры более существенно. Эти зависимости резко изменяются при объемной доле воды, превышающей значение 0,06–0,07, что подтверждает различие диэлектрических свойств связанной воды в форме мономолекулярных слоев и в форме "гроздьев" молекул, сгруппированных у центров адсорбции.

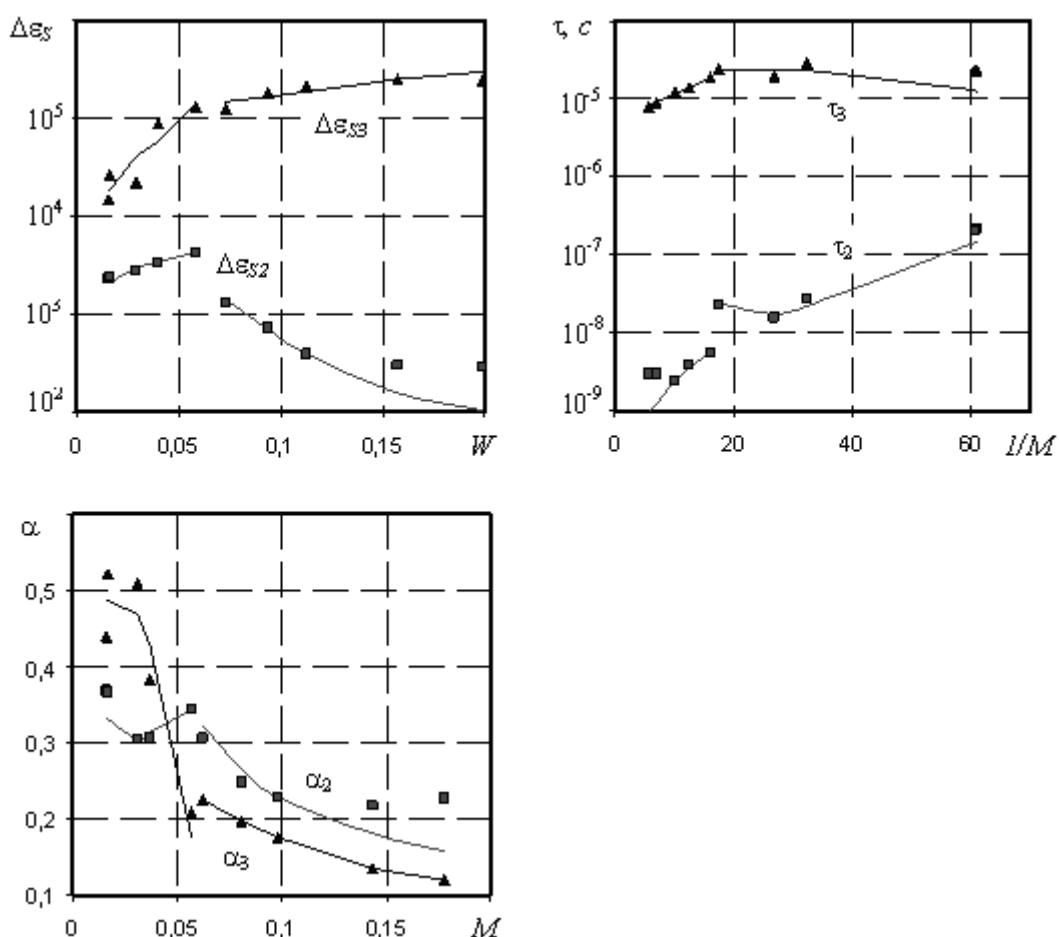


Рис. 4. Зависимость параметров модели КДП связанной воды от влажности. Маркерами отмечены значения, найденные при индивидуальном подборе, линиями – по регрессионным уравнениям

Результаты индивидуального подбора параметров модели (3) для всех значений влажности, при которых измерялась КДП бентонита, показаны на рис. 4 маркерами. Наблюдается резкое изменение тренда зависимости этих параметров от влажности (или об-

ратной влажности) при доле воды 0,06–0,07. Эти зависимости можно описать регрессионными уравнениями в двух диапазонах значений влажности – от 0,015 до 0,06 м³/м³ и от 0,07 до 0,2 м³/м³.

В диапазоне меньших влажностей параметры модели аппроксимировались полиномами второй степени

$$y = Ax^2 + Bx + C, \quad (4)$$

где y – параметр модели, x – или весовая влажность M , или обратная влажность $1/M$. Значения коэффициентов полинома приведены в *табл. 1*.

Из-за сильного влияния даже небольших изменений плотности сухого сложения на КДП бентонита при влажностях от 0,07 до 0,2 м³/м³ регрессионные уравнения выбирались в виде суммы полинома второй степени, описывающего зависимость от $1/M$ (или от M) и линейного члена, определяющего зависимость от относительной плотности сухого сложения ρ :

$$y = Ax^2 + Bx + C + D\rho. \quad (5)$$

Значения коэффициентов полинома приведены в *табл. 2*.

При вычислении параметров модели (3) с помощью регрессионных уравнений в каждом из выбранных образцов результаты расчетов КДП бентонита отклоняются от экспериментальных данных по действительной части КДП не более, чем на 10%, а по мнимой – на 15–20% (см. *рис. 5*).

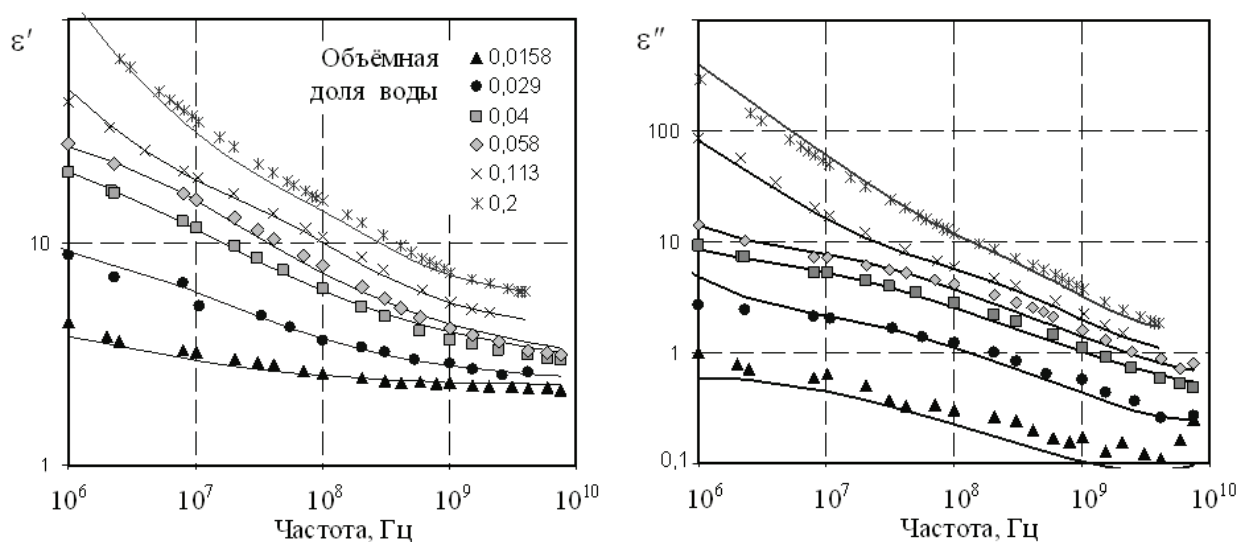


Рис. 5. Сопоставление результатов расчета КДП бентонита по модели (сплошные линии) с экспериментом (маркеры)

Таблица 1. Коэффициенты уравнений регрессии для параметров многорелаксационной модели связанной воды в диапазоне значений влажности 0,015–0,06 м³/м³

y	x	A	B	C
$\Delta\epsilon_{S2}$	1/M	1,419	- 159,5	$6,59 \cdot 10^3$
τ_2 , с	1/M	$1,01 \cdot 10^{-10}$	$-5,13 \cdot 10^{-9}$	$8,22 \cdot 10^{-8}$
a_2	1/M	$8,70 \cdot 10^{-5}$	$-7,05 \cdot 10^{-3}$	0,441
$\Delta\epsilon_{S3}$	M	$5,81 \cdot 10^7$	$-1,21 \cdot 10^6$	$2,24 \cdot 10^4$
τ_3 , с	1/M	$9,51 \cdot 10^{-9}$	$5,03 \cdot 10^{-7}$	$1,73 \cdot 10^{-5}$
a_3	M	$-2,46 \cdot 10^2$	10,4	0,381

Таблица 2. Коэффициенты уравнений регрессии для параметров многорелаксационной модели в диапазоне значений влажности 0,07 – 0,2 м³/м³

y	x	A	B	C	D
$\Delta\epsilon_{S2}$	1/M	10,52	-100,9	763,3	-379,6
τ_2 , с	1/M	$2,51 \cdot 10^{-11}$	$-1,09 \cdot 10^{-10}$	$-2,81 \cdot 10^{-9}$	$3,25 \cdot 10^{-9}$
a_2	1/M	$5,69 \cdot 10^{-6}$	$1,61 \cdot 10^{-2}$	0,137	$-6,38 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\epsilon_{S3}$	M	$1,39 \cdot 10^6$	$9,99 \cdot 10^5$	$3,65 \cdot 10^4$	$3,68 \cdot 10^4$
τ_3 , с	1/M	$4,11 \cdot 10^{-8}$	$2,02 \cdot 10^{-7}$	$1,47 \cdot 10^{-5}$	$-8,16 \cdot 10^{-6}$
a_3	M	-5,903	-2,325	0,347	0

Температурная зависимость КДП связанной воды

Из температурных зависимостей КДП бентонита с помощью (1) и (2) найдены температурные зависимости КДП связанной воды и найдены зависимости от температуры параметров модели связанной воды (3). При возрастании температуры возрастает КДП бентонита (см. *рис. 2*) и, следовательно, связанной воды во всем исследованном диапазоне частот, что характерно для межповерхностной поляризации. Параметры $\Delta\epsilon_S$ для второй и третьей областей релаксации модели (3) в указанном температурном диапазоне приведены на *рис. 6*. Параметры модели Дебая, описывающей ориентационную поляризацию, мы считали не зависящими от температуры по причине, указанной выше.

Из *рис. 6а* следует, что при возрастании температуры до 45 °С значения $\Delta\epsilon_{S2}$ при разных влажностях стремятся к одному пределу. Причём, чем больше влажность образца, тем при более высокой температуре наблюдается приближение к этому пределу. Этот факт можно объяснить испарением молекул связанной воды при нагревании, которое практически прекращается при уменьшении толщины пленки до одного мономолекулярного слоя (влажность 0,074 лишь немного выше влажности, соответствующей одному монослою).

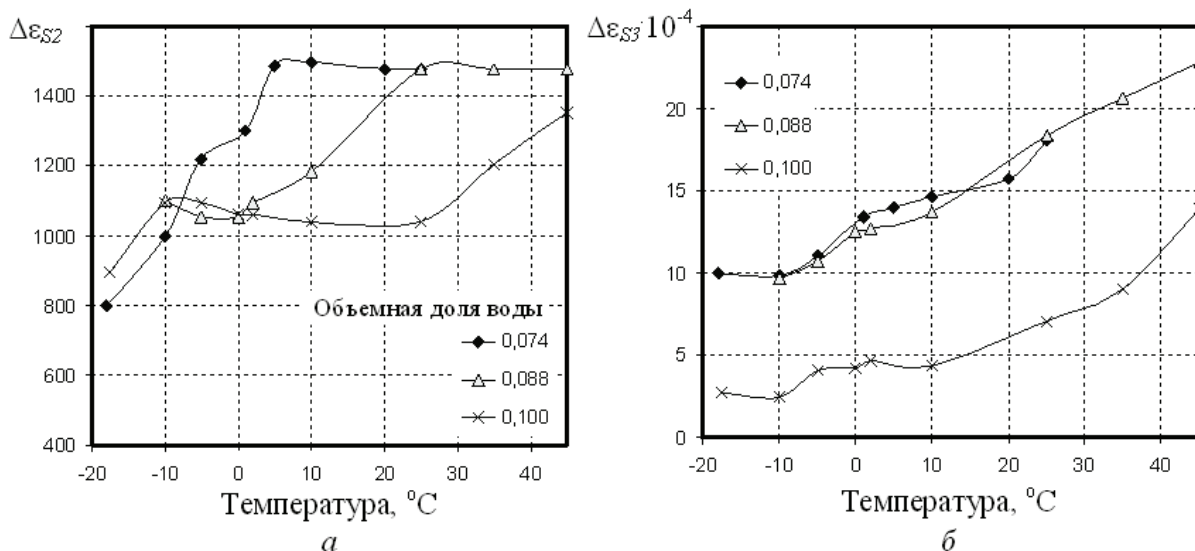


Рис. 6. Температурная зависимость параметров $\Delta\epsilon_{S2}$ и $\Delta\epsilon_{S3}$ для второй (а) и третьей (б) областей релаксации

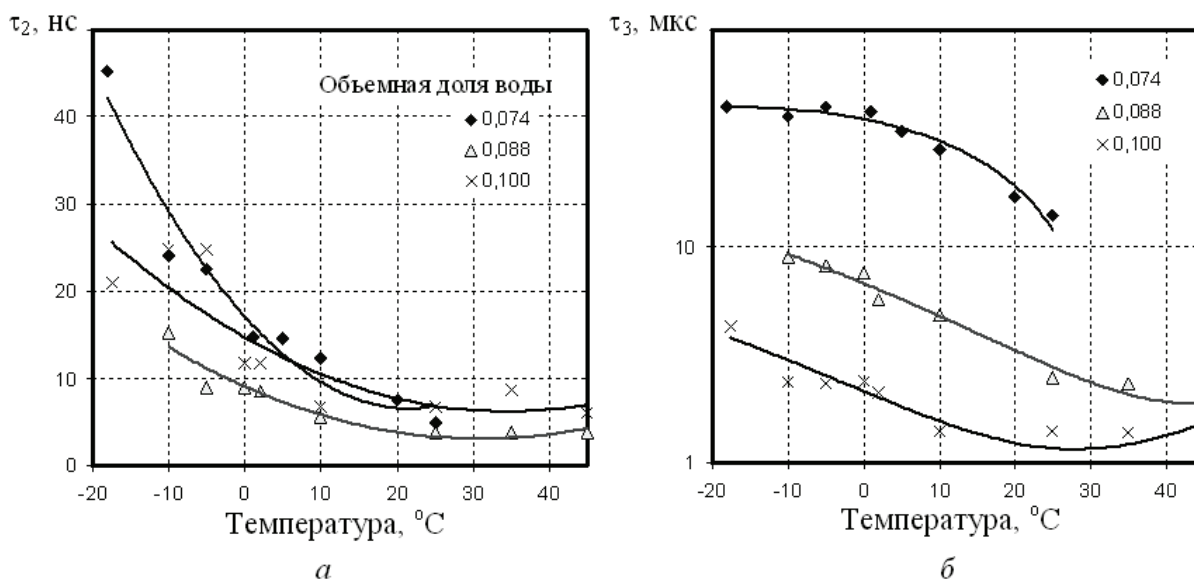


Рис. 7. Температурная зависимость параметров τ_2 (а) и τ_3 (б)

Регрессионные уравнения зависимости параметров $\Delta\epsilon_{S2}$ и $\Delta\epsilon_{S3}$ от температуры приведены в табл. 3. Температурные зависимости времен релаксации приведены на рис. 7.

Время релаксации убывает с ростом температуры во второй и третьей областях в диапазоне температур от $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ по квадратичному закону. Регрессионные уравнения приведены в табл. 4. Уменьшение времени релаксации можно объяснить за счёт частичной десорбции воды при возрастании температуры и возможными изменениями в структуре релаксаторов «связанная вода - твёрдые частицы - воздух»

Таблица 3. Температурные зависимости параметров $\Delta\varepsilon_{S2}$ и $\Delta\varepsilon_{S3}$ в диапазоне температур от $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$

$W, \text{ м}^3/\text{м}^3$	Регрессионное уравнение	Квадрат коэффициента корреляции
0,074	$\Delta\varepsilon_{S2} = -0,0099t^3 - 0,4959t^2 + 23,901t + 1319,6$	0,9773
	$\Delta\varepsilon_{S3} \cdot 10^{-4} = 9 \cdot 10^{-3}t^2 + 0,1854t + 12,529$	0,9508
0,088	$\Delta\varepsilon_{S2} = -0,0137t^3 - 0,6704t^2 + 6,2531t + 1072,4$	0,9827
	$\Delta\varepsilon_{S3} \cdot 10^{-4} = 10^{-3}t^2 + 0,2369t + 12,072$	0,9943
0,100	$\Delta\varepsilon_{S2} = 0,00093t^3 - 0,2822t^2 + 0,5091t + 10778$	0,9149
	$\Delta\varepsilon_{S3} \cdot 10^{-4} = 2,9 \cdot 10^{-3}t^2 + 0,079t + 3,6894$	0,9618

Таблица 4. Регрессионные уравнения времени релаксации, описывающие температурные зависимости в диапазоне температур $-18 \div +45\text{ }^{\circ}\text{C}$

$W, \text{ м}^3/\text{м}^3$	Регрессионное уравнение	Квадрат коэффициента корреляции
0,074	$\tau_2 \cdot 10^9 = 0,0228t^2 - 0,9789t + 17,097$	0,9535
	$\tau_3 \cdot 10^6 = -0,0181t^2 - 0,6216t + 38,739$	0,9500
0,088	$\tau_2 \cdot 10^9 = 0,0062t^2 - 0,3859t + 9,0597$	0,9246
	$\tau_3 \cdot 10^6 = 0,0025t^2 - 0,2229t + 6,758$	0,9745
0,100	$\tau_2 \cdot 10^9 = 0,0072t^2 - 0,4948t + 14,732$	0,7345
	$\tau_3 \cdot 10^6 = 0,0013t^2 - 0,0713t + 2,1509$	0,8743

Параметры распределения времён релаксации α_2 и α_3 в зависимости от температуры изменяются в пределах от 0,15 до 0,5 в диапазоне температур от $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ при влажностях от 0,016 до 0,100. Механизм поляризации характеризуется некоторой областью распределения времени релаксации. Такой характер поляризации бентонита, являющегося мелкодисперсной породой, обусловлен большим разнообразием форм, размеров и адсорбционной активностью частиц.

Проследим, как изменяется КДП связанной воды в бентоните при изменении ее количества. На рис. 8 приведены зависимости от влажности КДП связанной воды при разных температурах, рассчитанные по модели (3). При малых влажностях диэлектрическая проницаемость низкая потому, что значительная часть молекул сильно привязана к активным центрам минерала. При возрастании влажности диэлектрическая проницаемость возрастает и достигает максимальных значений на частоте 1 ГГц при объемной доле воды около 0,04, а на частоте 1 МГц при доле воды около 0,07. Существует предположение, что при таких значениях влажности значительная доля молекул образует "гроздь" вокруг активных центров и слабо связана с поверхностью твердой фазы. Затем при дальнейшем

возрастании влажности диэлектрическая проницаемость связанной воды начинает уменьшаться. Молекулы воды начинают образовывать сплошные пленки, в составе которых энергия связи молекул выше, чем в состоянии "гроздьев".

При возрастании температуры действительная и мнимая части КДП возрастают (за исключением случаев очень малой влажности). Отметим, что на частоте 1 ГГц зависимость КДП от влажности и температуры слабее, чем на частоте 1 МГц.

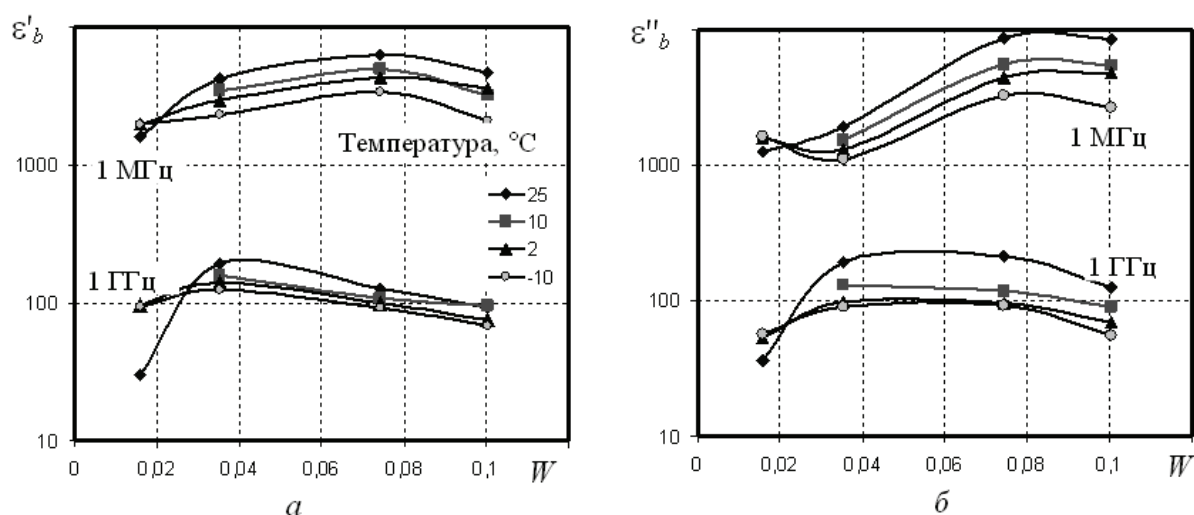


Рис. 8. Зависимость от влажности и температуры действительной (а) и мнимой (б) частей КДП связанной воды в бентоните на двух частотах

Заключение

Проведены экспериментальные измерения КДП образцов бентонита в диапазоне влажностей от 0,0158 до 0,2 м³/м³. Показано, что основное влияние на КДП бентонита в диапазоне частот 10 МГц – 8,5 ГГц оказывает межповерхностная поляризация на границе вода-твердая фаза. В результате экспериментальных исследований обнаружено, что при малых влажностях, когда еще не образуется сплошной мономолекулярный слой воды на поверхности почвенных частиц, диэлектрические свойства воды отличаются от свойств воды, образующей мономолекулярные слои.

Найдены параметры многорелаксационной модели КДП бентонита, описывающей его диэлектрические свойства в зависимости от влажности, плотности и температуры. На частотах 10 МГц – 4 ГГц отклонения расчетных значений от экспериментальных в абсолютном большинстве случаев не превышают 10% для действительной части КДП и 15–20 % для мнимой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 13-05-00502, 12-05-98082-р_сибирь_a).

Литература

1. Беляева Т.А., Бобров А.П., Бобров П.П., Галеев О.В., Мандрыгина В.Н. Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0,1-20 ГГц // Исследование Земли из космоса. 2003. № 5. С. 28–34.
2. Беляева Т.А., Бобров П.П., Ивченко О.А., Мандрыгина В.Н. Зависимость диэлектрической проницаемости связанной воды в почвах от ее количества // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 2. С. 281–286.
3. Беляева Т. А., Бобров П. П., Кондратьева О. В. Изменение диэлектрических свойств связанной воды в почвах при увеличении ее количества // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева (Вестник СибГАУ). 2013. Специальный выпуск 5(51). С. 92–95.
4. Бобров П.П., Кондратьева О.В., Репин А.В. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости образца в одной ячейке от десятков герц до единиц гигагерц // Известия Вузов. Физика. 2012. № 8/3. С. 23–26.
5. 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.
6. Боярский Д.А., Тихонов В.В. Учет диэлектрических свойств связанной воды при моделировании эффективной диэлектрической проницаемости влажных почв в СВЧ-диапазоне. // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43. № 4. С. 446–454.
7. Boyarskii D. A., Tikhonov V. V., Komarova N. Yu. Model of dielectric constant of bound water in soil for applications of microwave remote sensing // Progress in Electromagnetics Research, PIER. 2002. Vol. 35. P. 251–269.
8. Ishida T., Makino T., Wang C. Dielectric-relaxation spectroscopy of kaolinite, montmorillonite, allophane, and imogolite under moist conditions // Clays and Clay Minerals. 2000. Vol. 48. № 1. P. 75–84.
9. Kelleners T. J., Robinson D. A., Shouse P. J. Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 2005. Vol. 69. № 1. P. 67–76.
10. Mironov V.L., Bobrov P.P., Kosolapova L.G., et al. Data processing technique for deriving soil water spectroscopic parameters in microwave // Proceedings of the 2006 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Denver, USA. 2006. Vol. 6. P. 2957–2961.
11. Mironov V.L., Bobrov P.P., Fomin S.V. Multirelaxation generalized refractive mixing dielectric model of moist soils // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2013. Vol. 10. № 3. P. 603–606.
12. Mironov V.L., Dobson M.C., Kaupp V.H., et al. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2004. Vol. 42. № 4. P. 773–785.

The dependence of bound water dielectric constant in bentonite on moisture and temperature

T.A. Belyaeva¹, P.P. Bobrov¹, V.L. Mironov², O.V. Rodionova¹

¹ Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russia

E-mail: tabel.omgpu@mail.ru

² Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of RAS, Krasnoyarsk, Russia

E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

The results of complex dielectric permittivity (CDP) measurements of bentonite depending on moisture and temperature at frequencies from 1 MHz to 8.5 GHz are presented. Dielectric properties of bound water are investigated using refractive mixing dielectric model. It is shown that CDP of bound water at frequencies below 1 GHz depends on its quantity, and this dependence is not monotonic. The real and imaginary parts of the CDP reach maximum values at the moisture of 0,04-0,07 m³/m³ and increase with temperature rise. A model describing bound water CDP dependence on frequency, temperature and moisture, including three frequency relaxation areas, is created. The regression equations relating the parameters of the model to temperature and moisture were found. Bentonite CDP model results deviate from experimental data by less than 10% for the real part of CDP, and 15-20% for the imaginary part.

Keywords: dielectric permittivity, bound water, bentonite, dielectric relaxation, refractive mixing dielectric model.

References

1. Belyayeva T.A., Bobrov A.P., Bobrov P.P., Galeev O.V., Mandrygina V.N., Opredeleniye parametrov modely dielektricheskoy pronitsayemosti pochv s razlichnoy plotnost'yu i razlichnym sodержaniyem gumusa po dannym eksperimental'nykh izmereniy v chastotnom diapazone 0,1 - 20 GGts (Determining the parameters of dielectric constant of soils with different densities and different humus according to the experimental measurements at frequency range of 0.1-20 GHz), *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2003, No. 5, pp. 28–34.
2. Belyayeva T.A., Bobrov P.P., Ivchenko O.A., Mandrygina V.N., Zavisimost' dielektricheskoy pronitsayemosti svyazannoy vody v pochvakh ot yeye kolichestva (Dependence of bound water dielectric constant in soils on its quantity), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 3, No. 2, pp. 281–286.
3. Belyayeva T.A., Bobrov P.P., Kondrat'yeva O.V., Izmeneniye dielektricheskikh svoystv svyazannoy vody v pochvakh pri uvelichenii yeye kolichestva (Change in the dielectric properties of bound water in the soils by increasing its quantity), *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo un-ta im. akad. M. F. Reshetneva (Vestnik SibGAU)*, 2013, 5(51), pp. 92–95.
4. Bobrov P.P., Kondrat'yeva O.V., Repin A.V., Izmereniye kompleksnoy dielektricheskoy pronitsayemosti obraztsa v odnoy yacheyke ot desyatkov gerts do yedinitz gigagerts (Measurement of the sample's complex permittivity in a single cell from tens of Hz to several GHz), *Izvestiya Vuzov. Fizika*, 2012, No. 8/3, pp. 23–26.
5. Bobrov P.P., Mironov V.L., Ivchenko O.A., Krasnoukhova V.N., Spektroskopicheskaya model' dielektricheskoy pronitsayemosti pochv, ispol'zuyushchaya standartizovannyye agrofizicheskiye pokazateli (Spectroscopic model of soils' permittivity using standardized agrophysical indicators), *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2008, No. 1, pp. 15–23.
6. Boyarskiy D.A., Tikhonov V.V., Uchet dielektricheskikh svoystv svyazannoy vody pri modelirovanii effektivnoy dielektricheskoy pronitsayemosti vlazhnykh pochv v SVCH-diapazone (Account of the bound water dielectric properties in the simulation of the moist soils effective permittivity in the microwave range), *Radioelekhnika i elektronika*, 1998. Vol. 43, No. 4, pp. 446-454.
7. Boyarskii D.A., Tikhonov V.V., Komarova N.Yu., Model of dielectric constant of bound water in soil for applications of microwave remote sensing, *Progress in Electromagnetics Research, PIER*, 2002, Vol. 35, pp. 251–269.
8. Ishida T., Makino T., Wang C., Dielectric-relaxation spectroscopy of kaolinite, montmorillonite, allophane, and imogolite under moist conditions, *Clays and Clay Minerals*, 2000, Vol. 48, No. 1, pp. 75–84.
9. Kelleners T. J., Robinson D. A., Shouse P. J., 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, pp. 67–76.
10. Mironov V.L., Bobrov P.P., Kosolapova L.G., et al., Data processing technique for deriving soil water spectroscopic parameters in microwave, *Proceedings of the 2006 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Denver, USA*, 2006, Vol. 6, pp. 2957–2961.
11. Mironov V.L., Bobrov P.P., Fomin S.V., Multirelaxation generalized refractive mixing dielectric model of moist soils, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 603–606.
12. Mironov V.L., Dobson M.C., Kaupp V.H., et al., Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2004, Vol. 42, No. 4, pp. 773–785.