

# Зависимость диэлектрической проницаемости связанной воды в почвах от ее количества

Т.А. Беляева<sup>1</sup>, П.П. Бобров<sup>2</sup>, О.А. Ивченко<sup>1</sup>, В.Н. Мандрыгина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный педагогический университет  
644099 Омск, Наб. Тухачевского, 14  
Email: [tabel@omgpu.omsk.edu](mailto:tabel@omgpu.omsk.edu)

<sup>2</sup>Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН  
660036 Красноярск, Академгородок  
Email: [rsd@ksc.krasn.ru](mailto:rsd@ksc.krasn.ru)

Приведены частотные зависимости диэлектрической проницаемости (ДП) связанной воды в зависимости от её количества в образцах почв, отличающихся друг от друга по гранулометрическому и минералогическому составу. ДП связанной в почвах воды определена в широком диапазоне частот от 0,1 ГГц до 11,3 ГГц с использованием рефракционной модели в предположении о том, что маловлажнённая почва является смесью сухой почвы и связанной воды. По данным о частотной зависимости ДП связанной воды произведена оценка параметров модели Дебая. В экспериментальных исследованиях выявлена зависимость ДП связанной воды от толщины плёнки на поверхности почвенных частиц, наиболее отчётливо проявляющаяся в почвах с высоким содержанием гумуса. В таких почвах наблюдается увеличение времени релаксации при уменьшении влажности. Учёт ДП связанной воды от её количества необходим при исследовании межфазных взаимодействий в почве.

Сведения о частной зависимости диэлектрической проницаемости (ДП) почв необходимы в микроволновом зондировании. Диэлектрическая проницаемость влажных почв сложным образом зависит от частоты, поскольку почва содержит компоненты, обладающие релаксационными свойствами. Хорошо известны свойства свободной воды, находящейся в почвенных порах и капиллярах. Считается, что взаимодействие со стенками капилляров не приводит к изменению времени релаксации и диэлектрические свойства свободной воды в почвах могут быть в широком диапазоне частот описаны моделью Дебая.

Частотная зависимость ДП связанной воды изучена хуже из-за того, что связанная вода всегда находится в смеси с твердой фазой почвы и воздухом, и ее диэлектрическая проницаемость определяется косвенным методом через диэлектрические модели смесей. К сожалению, модели, работающие во всем диапазоне значений объемных долей компонент смесей, являются приближенными. Наиболее подходящей для решения задач дистанционного микроволнового зондирования является рефракционная модель смеси, включающая сухую почву, связанную и свободную воду [1, 2]:

$$\sqrt{\varepsilon} = \sum_i V_i \sqrt{\varepsilon_i} . \quad (1)$$

Здесь  $\varepsilon$  – ДП смеси,  $\varepsilon_i$ ,  $V_i$  – ДП и объемные доли компонент, соответственно.

ДП сухой почвы слабо зависит от ее плотности (точнее от доли твердой фазы). Эту зависимость либо учитывают [3,4], используя модель Бруггемана, либо ею пренебрегают. Обычно ДП связанной воды считают не зависящей от ее количества в почве. Однако точные диэлектрические измерения показывают, что в области малых влажностей, когда вся вода в почве находится в связанном состоянии, наблюдаются отклонения от модели (1), предполагающей постоянство ДП связанной воды.

Зависимость диэлектрических свойств связанной воды от толщины ее пленки на поверхности почвенных частиц учитывается в некоторых моделях [5, 6]. Предполагается, что при малом увлажнении вода образует на поверхности частиц мономолекулярные слои. Наиболее прочно связан с поверхностью первый мономолекулярный слой. В каждом последующем слое молекулы воды связаны с поверхностью менее прочно. Таким образом, каждой элементарной порции почвенной влаги  $dW$  можно придать свое значение диэлектрической проницаемости. Если сделать предположение о справедливости модели Дебая для связанной воды, тогда можно записать следующие выражения для действительной  $\varepsilon'_b$  и мнимой  $\varepsilon''_b$  частей ДП связанной воды [5, 6]:

$$\varepsilon'_b - \varepsilon_\infty = \frac{1}{W} \int_0^W \frac{[\varepsilon_{0b}(W) - \varepsilon_\infty] dW}{1 + \omega^2 \tau^2(W)} \quad (2)$$

$$\varepsilon''_b = \frac{1}{W} \int_0^W \frac{[\varepsilon_{0b}(W) - \varepsilon_\infty] \omega \tau(W) dW}{1 + \omega^2 \tau^2(W)} + 60\lambda \frac{1}{W} \int_0^W \sigma(W) dW \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{0b}(W)$ ,  $\varepsilon_\infty$  – статическая и высокочастотная диэлектрические проницаемости связанной воды, соответственно,  $\tau(W)$  – время релаксации,  $\sigma(W)$  – проводимость,  $W$  – влажность почвы,  $\omega$  и  $\lambda$  круговая частота и длина волны в вакууме, соответственно. При моделировании зависимости диэлектрической проницаемости почвы от влажности либо используются значения  $\tau(W)$ , измеренные методом ЯМР [6] для пленок разной толщины, как это сделано в [7], либо предлагается связывать время релаксации с капиллярно-сорбционным потенциалом почвенной влаги [8]. При этом предполагается, что  $\varepsilon_{0b}$  – величина постоянная, равная статической диэлектрической проницаемости свободной воды, а высокочастотная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_\infty = 4.9 - 5.1$ .

Параметры  $\tau(W)$ ,  $\varepsilon_{0b}(W)$ ,  $\sigma(W)$  можно определить для фиксированных значений влажности, если измерять ДП связанной воды при одном и том же значении влажности почвы в широком диапазоне частот. К сожалению, с одним и тем же почвенным образцом провести такие измерения затруднительно, так как минимальная "оптическая" длина образца для достижения удовлетворительной точности измерений в длинноволновой части диапазона должна быть больше  $0,1\lambda$ . При этом на частоте, в 100 раз большей, длина образца будет составлять  $10\lambda$ . При такой длине образца даже при его невысокой влажности коэффициент пропускания будет меньше -15 дБ. При этом точность измерения ДП используемым нами амплитудным методом будет невысокой.

Измерение модулей коэффициентов отражения и пропускания почвенных образцов, размещаемых в коаксиальной ячейке, производилось нами с помощью измерителей P2-106 (диапазон 0,3-6 ГГц) и P2-54/4 (диапазон 8-10 ГГц). Погрешность измерения ДП почвы составляет около 10% для действительной части и около 15% – для мнимой части.

Расчёты ДП связанной воды проводились в предположении о том, что маловлажнённая почва является смесью сухой почвы и связанной воды:

$$\sqrt{\varepsilon} = (1 - W)\sqrt{\varepsilon_d} + W\sqrt{\varepsilon_b}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_d$  – комплексная ДП сухой почвы,  $\varepsilon_b$  – комплексная ДП связанной воды,  $W$  – объёмная влажность почвы. Ввиду того, что связанная вода при малых влажностях почвы дает небольшой вклад в общую диэлектрическую проницаемость образца, погрешность определения диэлектрической проницаемости связанной воды может быть в 3-4 раза выше погрешности определения ДП почвы.

Результаты расчётов  $\varepsilon'_b$  и  $\varepsilon''_b$  для разных значений относительной влажности  $W/W_t$  приведены на рис. 1 и 2, соответственно, для Курского чернозёма и на рис. 3 и 4 – для Эвенкийского тиксотропного криозёма ( $W_t$  – максимальное количество связанной воды в каждом типе почвы). Здесь приведены усредненные данные для ДП связанной воды в предположении, что при определенной толщине пленки на поверхности почвенных частиц ДП связанной воды одинакова для всех мономолекулярных слоев. Как видно из представленных результатов, при увеличении относительной влажности и, соответственно, толщины пленки мнимая и действительная части диэлектрической проницаемости связанной воды возрастают.

По данным о частотной зависимости ДП связанной воды произведена попытка оценить параметры модели Дебая. Влияние различных констант этой модели ДП различно на разных частотах. В низкочастотной части диапазона на мнимую часть ДП связанной воды сильно влияет проводимость, а на действительную часть – статическая диэлектрическая проницаемость. В высокочастотной части диапазона на мнимую и действительную части ДП становится заметным влияние времени релаксации.

Для каждого значения относительной влажности  $W/W_t$  сначала подбирались проводимость, статическая диэлектрическая проницаемость связанной воды и время релаксации на нескольких частотах. Значе-

ние проводимости уточнялось на нескольких частотах низкочастотной части используемого диапазона (от 0,1 ГГц до 1,5 ГГц), поскольку на более высоких частотах её роль менее существенна. Затем при фиксированной проводимости на нескольких частотах корректировались значения статической ДП связанной воды и времени релаксации. Последний этап обработки заключался в подборе времени релаксации связанной воды при фиксированной проводимости и статической ДП связанной воды. На рис. 1, 2 линиями изображены зависимости действительной и мнимой частей комплексной ДП связанной воды для двух почвенных образцов - Курского чернозёма (целина) и Эвенкийского тиксотропного криозёма, рассчитанные по модели Дебая, в которую подставлены подобранные параметры – статическая ДП связанной воды и время релаксации.

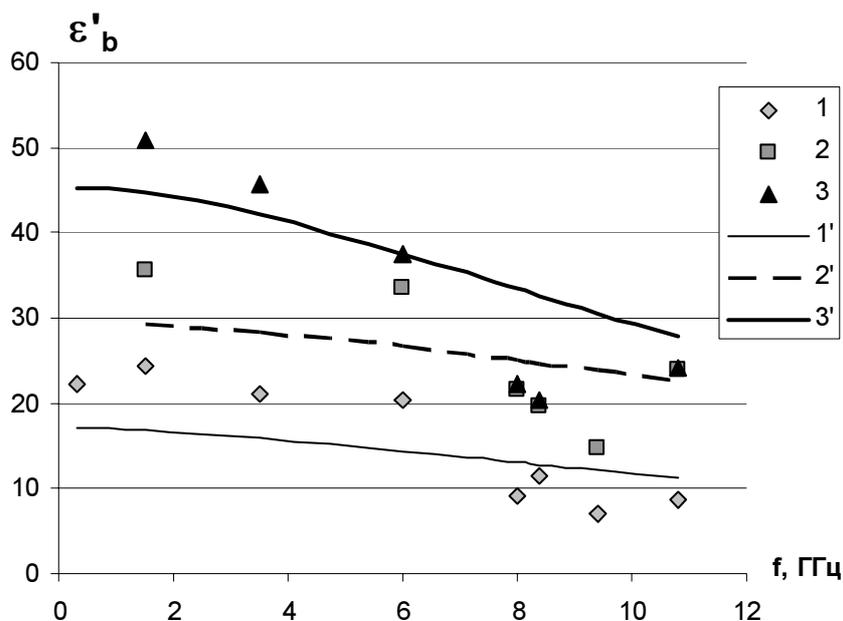


Рис. 1. Частотная зависимость действительной части комплексной ДП связанной воды в Курском чернозёме (целина) при различных значениях  $W/W_t$ : 1-при  $W/W_t=0,27$ ; 2- при  $W/W_t=0,54$ ; 3- при  $W/W_t=0,75$ ; линии - результаты расчёта по модели Дебая по подобранным параметрам: 1' – при  $W/W_t=0,27$ ; 2' - при  $W/W_t=0,54$ ; 3' - при  $W/W_t=0,75$

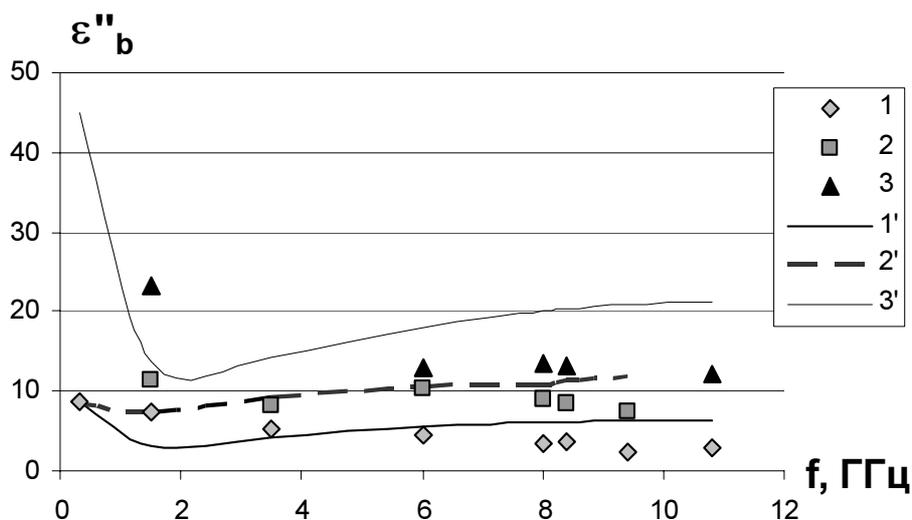


Рис. 2. Частотная зависимость мнимой части комплексной ДП связанной воды в Курском чернозёме (целина) при различных значениях  $W/W_t$ : 1-при  $W/W_t=0,27$ ; 2- при  $W/W_t=0,54$ ; 3- при  $W/W_t=0,75$ ; линии - результаты расчёта по модели Дебая по подобранным параметрам: 1' – при  $W/W_t=0,27$ ; 2' - при  $W/W_t=0,54$ ; 3' - при  $W/W_t=0,75$

Значения констант модели Дебая приведены в табл.1.

Таблица 1. Значения констант модели Дебая для связанной воды

Образец	Содержание гумуса, %	Содержание физической глины, %	$W_t$	$W/W_t$	$\epsilon_0$	$\tau, \text{нс}$
Курский чернозём, целина	9,98	54,14	0,205	0,27	$17 \pm 6$	$14 \pm 8$
				0,54	$29 \pm 9$	$11 \pm 4$
				0,75	$45 \pm 15$	$13 \pm 8$
Эвенкийский тиксотропный криозём	3,25	28,4	0,12	0,03	$51 \pm 12$	$8 \pm 3$
				0,06	$50 \pm 10$	$10 \pm 6$
				0,42	$50 \pm 6$	$8 \pm 7$
				0,48	$51 \pm 7$	$10 \pm 7$
				0,51	$49 \pm 8$	$9 \pm 7$
				0,75	$51 \pm 18$	$8 \pm 5$
				0,85	$51 \pm 9$	$9 \pm 5$

На рис. 3 приведена зависимость статической ДП связанной воды от относительной влажности для Курского чернозёма (целина) (1) и Эвенкийского тиксотропного криозёма (2). Прослеживается существенная зависимость статической ДП связанной воды в Курском чернозёме от относительной влажности, что говорит о существенном различии вкладов различных слоёв связанной воды в интегральную ДП. По мере возрастания влажности статическая ДП связанной в Курском чернозёме воды возрастает, постепенно приближаясь к ДП свободной воды. Для Эвенкийского тиксотропного криозёма статическая ДП связанной воды практически не зависит от относительной влажности, оставаясь достаточно высокой при всех значениях относительной влажности. Следует отметить, что из-за низкого содержания гумуса и физической глины в криозёме лишь небольшая доля воды находится в связанном состоянии. Как уже говорилось выше, чем меньше доля связанной воды, тем больше погрешность определения ДП связанной воды и констант Дебая.

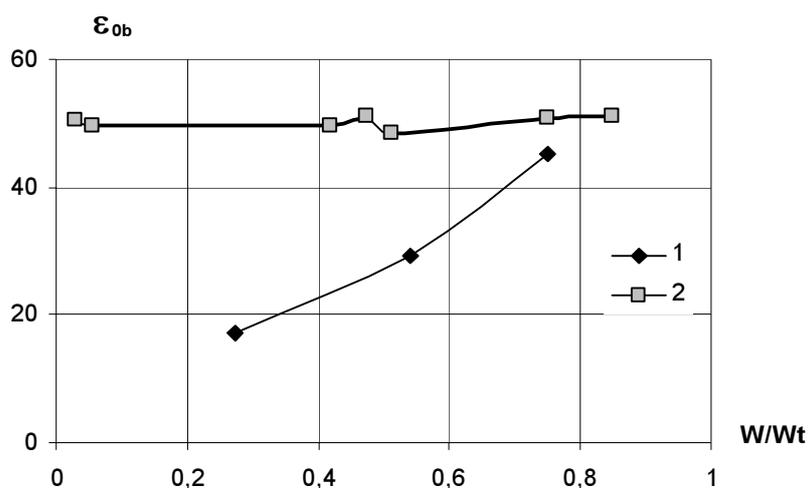


Рис. 3. Зависимость статической ДП связанной воды от относительной влажности: 1-для Курского чернозёма (целина) и 2 – для Эвенкийского тиксотропного криозёма

Время релаксации этих образцов при различных относительных влажностях приведено на рис. 4. Видно, что с увеличением влажности (в области связанной воды) время релаксации убывает для Курского чернозёма, а для криозёма оно практически не изменяется.

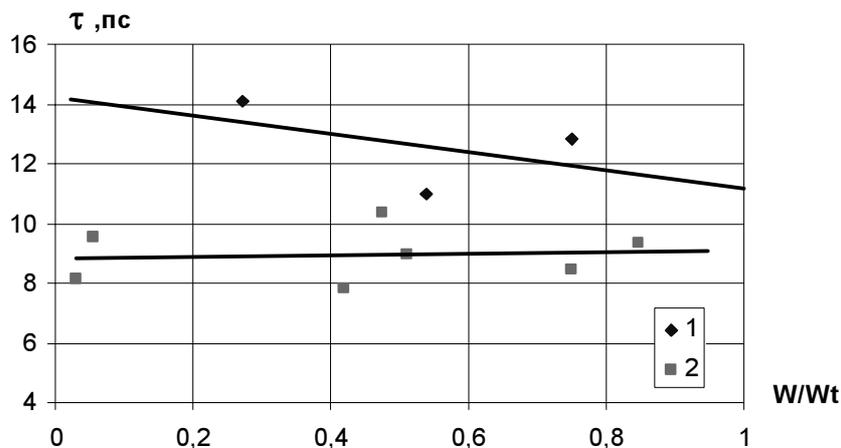


Рис. 4. Зависимость времени релаксации воды, связанной в образце Курского чернозёма (1) и Эвенкийского тиксотропного криозёма (2)

Таким образом, в экспериментальных исследованиях выявлена зависимость диэлектрической проницаемости связанной воды от толщины пленки на поверхности почвенных частиц – с увеличением толщины пленки диэлектрическая проницаемость возрастает. Наиболее отчетливо эта зависимость проявляется в почвах с высоким содержанием гумуса, где значительная часть воды (до половины его возможного количества) находится в связанном состоянии. В почвах с малым содержанием связанной воды установить эту зависимость пока не удалось из-за высокой погрешности определения ДП связанной воды.

Анализируя эти данные, можно отметить, что для образцов Курского чернозёма, имеющих высокое содержание гумуса и физической глины, наблюдается увеличение времени релаксации при уменьшении влажности. Возможно, это связано с увеличением вязкости органо-минеральных комплексов (ОМК). В работе [9] описано резкое возрастание вязкости ОМК при повышении их концентрации. Увеличение вязкости, по мнению авторов этой работы, происходит из-за структурной перестройки гидрофобных компонентов.

Увеличение времени релаксации можно, по-видимому, связать и с увеличением свободной энергии поверхности воды из-за структурной перестройки гидрофобных компонентов и уменьшением энтропии в поверхностном слое, что в итоге приводит к увеличению энергии активации молекул связанной влаги по сравнению с молекулами объёмной. Увеличение свободной энергии поверхности связанной воды можно объяснить увеличением количества водородных связей, которые приводят к увеличению коэффициента поверхностного натяжения связанной воды. Наличие дополнительных водородных связей в поверхностном слое воды приводит к ориентации диполей нормально к поверхности (около 30% диполей ориентировано нормально к поверхности) и к уменьшению энтропии поверхностного слоя [10].

Образец Эвенкийского тиксотропного криозёма содержит меньшее количество гумуса и физической глины. Время релаксации связанной воды для этого образца мало изменяется во всём диапазоне нормированной влажности, а также мало отличается от времени релаксации свободной воды. В таком образце, по-видимому, вода связана с гидрофильными компонентами, а структурной перестройки гидрофобных компонентов не происходит. В этом случае с уменьшением влажности свободная энергия поверхности воды уменьшается, энтропия поверхностного слоя тоже уменьшается, поэтому энергия активации связанной воды не сильно отличается от энергии активации свободной воды. Возможно, связанная вода в таком образце формируется гроздьями на гидрофильных центрах, которых в таком образце больше, чем в чернозёмах Омском и Курском. Таким образом, время диэлектрической релаксации позволяет выявить существенную разницу в поведении ОМК разных почв, наряду с другими методами.

Учет зависимости ДП связанной воды от ее количества необходим при исследовании межфазных взаимодействий в почве. В задачах моделирования сечения рассеяния и радиояркостной температуры этот учет не приведет к существенному уменьшению погрешности, поскольку время релаксации заметно возрастает лишь при небольших влажностях (менее  $0,04-0,08 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ), когда влияние ДП связанной воды на ДП почв невелико.

### Литература

1. *Birchak J.R., Gardner G.G., Hipp J.E., Victor J.M.* High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture // Proc. IEEE. 1974. V.62. P.93-98.
2. *Mironov V.L., Dobson M.C., Kaupp V.H., Komarov S.A., Kleshchenko V.N.* Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2004. Vol. 42. No. 4. P. 773-785.
3. *Беляева Т.А., Бобров А.П., Бобров П.П., Мандрыгина В.Н.* О выборе диэлектрической модели при определении диэлектрической проницаемости связанной воды в грунтах // Тез. докл. Второй открытой Всероссийской конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" Москва, 16-18 ноября 2004 г. С.181.
4. *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.
5. *Спиридонов В.И.* Релаксационная модель диэлектрических свойств воды в гетерогенных смесях // Измерительная техника, 1982. № 5. С. 68-70.
6. *Квливидзе В.И.* Поверхностные пленки воды в дисперсных структурах // М.: МГУ, 1988. С.32.
7. *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.
8. *Подковко Н.Ф.* Модель комплексной диэлектрической проницаемости почвогрунтов на СВЧ // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общ. вопр. радиоэлектр. 1990. Вып.1. С.73.
9. *Никонова С.И., Никонов А.М.* Изучение почвенных амфолитов - органо-минеральных гелей методом спинового зонда // Межведомственный сборник «Вода в биологических системах и их компонентах». Ленинград: Изд-во Ленинградского университета, 1983. С. 158-166.
10. *Кочурова Н.Н.* Водородные связи на поверхности воды // Межведомственный сборник «Вода в биологических системах и их компонентах». Ленинград: Изд-во Ленинградского университета, 1983. С. 152-156.