

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАПИЛЛЯРНО-МЕНИСКОВОЙ  
ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ

© 2011 г. Т. А. Беляева, П. П. Бобров\*, О. В. Кондратьева, А. В. Репин

Омский государственный педагогический университет, Омск

\*E-mail: bobrov@omgpu.ru

Поступила в редакцию 15.03.2010 г.

Приведены результаты измерения комплексной диэлектрической проницаемости увлажненных дистиллированной водой порошков из сферических кварцевых гранул, порошка гидрофобного диэлектрика, речного песка, а также двух образцов естественных почв в диапазоне частот 0.1–8 ГГц. Обнаружено, что по диэлектрическим характеристикам в почве при влажности, не превышающей наименьшей влагоемкости, кроме прочно связанной воды можно выделить еще две ее формы. Показано, что диэлектрическая проницаемость этих двух форм воды зависит от физических свойств минерала, формы и размеров почвенных частиц. Найдены параметры модели Дебая для этих форм воды. Рассмотрены возможные причины, приводящие к изменению диэлектрической проницаемости воды при взаимодействии с почвенными частицами. Установлено, что влажность почвы, соответствующая переходу от одной формы воды к другой, близка к максимальной молекулярной влагоемкости.

**Ключевые слова:** диэлектрическая проницаемость, влажные смеси, сверхвысокие частоты, категории почвенной влаги, дистанционное зондирование

ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем микроволнового дистанционного зондирования (ДЗ) почв является зависимость комплексной диэлектрической проницаемости (КДП)  $\hat{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon''$  ( $j$  – мнимая единица) почв от влажности. Несмотря на большое количество экспериментальных данных и опубликованных работ (Лещанский, Лебедева и др., 1971; Dobson, Ulaby et al., 1985; Curtis, Weiss et al., 1995; Беляева, Бобров, 2003), остается до конца не решенной проблема создания моделей, способных адекватно описывать диэлектрические свойства с.-х. почв разных типов в диапазоне влажностей от нулевой до состояния полного водонасыщения и в диапазоне частот, используемых в микроволновом ДЗ (0.3–12 ГГц). В ряде работ удалось значительно продвинуться в деле создания моделей КДП, позволяющих получить зависимость диэлектрической проницаемости почвы от частоты и влажности, используя стандартизированные агрофизические показатели, в первую очередь содержание физической глины (почвенных частиц размером менее 0.01 мм) и гумуса (Mironov, Bobrov, 2003; Mironov, Dobson, 2004; Бобров, Миронов, 2008; Mironov, Kosolapova, 2009). С этими показателями статистически связаны максимальное количество связанной воды в почве и параметры модели Дебая, характеризующие ее КДП. Было установлено также, что диэлектрическая проницаемость свободной почвенной воды (в почвоведении ее подразделяют на капиллярно-менисковую и гравитацион-

ную) отличается от диэлектрической проницаемости истинно свободной воды и в разных почвах различна. Зависимостей КДП свободной почвенной влаги от каких-либо характеристик почв найдено не было, поэтому в моделях использовались усредненные значения параметров модели Дебая, найденные из экспериментальных измерений. Для почв с содержанием физической глины не менее 30% общей массы (суглинки и глинистые почвы) удовлетворительное согласование с экспериментом удавалось получить, принимая для статической диэлектрической проницаемости свободной почвенной воды при температуре 20–22°C значение  $\epsilon_{0в} = 100–101$ , для времени релаксации – значение  $\tau_v \approx 8$  пс. В песчаных почвах параметры модели Дебая свободной почвенной влаги варьировались в больших пределах и расхождение экспериментальных данных с расчетными увеличивалось.

С целью установления взаимосвязи КДП капиллярно-менисковой почвенной влаги с размерами частиц нами были проведены тщательные экспериментальные исследования КДП увлажненных порошков сферических кварцевых гранул, порошка диэлектрика СТ-10, речного песка и проведено сравнение с КДП некоторых естественных почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Было исследовано несколько образцов влажных порошков с разными размерами кварцевых гранул.

**Таблица 1.** Распределение частиц по размерам (в % от массы) и наименьшая влагоемкость (в объемных долях) образцов 1–5

№	Образец	Размер частиц, мкм							НВ, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
		0–10	10–25	25–50	50–100	100–200	200–400	400–800	
1	Кварцевые гранулы 10–50 мкм	0.08	18.89	76.81	4.22	–	–	–	0.35
2	Кварцевые гранулы 50–100 мкм	–	0.06	9.96	89.98	–	–	–	0.30
3	Кварцевые гранулы 100–400 мкм	–	–	0.01	1.93	56.52	41.54	–	0.26
4	Речной песок	–	–	–	–	2.4	67.46	30.14	0.30
5	Порошок СТ-10	63.0	37.0	–	–	–	–	–	–

Распределение частиц по размерам (в процентах от общей массы) и наименьшая влагоемкость (НВ) (максимальное количество воды, которое может удержать почва менисковыми или капиллярными силами после стекания всей гравитационной воды) приведены в табл. 1. Образцы 1–3 содержали кварцевые гранулы почти сферической формы с небольшим количеством эллипсоидных частиц и мелких обломков (рис. 1б, 1в). В образце естественного речного песка (образец 4) основную долю составляли удлиненные частицы неправильной формы, часть из них имела шероховатую поверхность (рис. 1з). Образец 5 (рис. 1а) представлял собой измельченный органический диэлектрик СТ-10 (сополимер стирола с  $\alpha$  – метилстиролом, наполненный двуокисью титана), имеющий в монолитной форме  $\epsilon' = 10 \pm \pm 0.5$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = 2 \times 10^{-3}$ . Частицы этого порошка имеют угловатую неправильную форму.

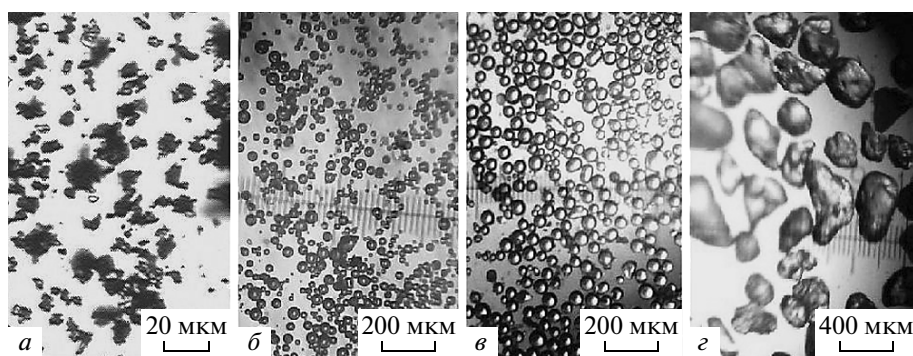
Распределение частиц по размерам в каждом типе порошков измерялось с помощью микроскопа. Исследуемые выборки содержали от 500 до 800 частиц. Распределение числа частиц по размерам переводили в массовые доли с учетом известной плотности минерала. В кварцевом порошке с наименьшим размером гранул (образец 1) основную массу составляют частицы с размерами 10–50 мкм. В образце 2 большая часть частиц почти равномерно

распределена в интервале 50–100 мкм. В образце 3 основная доля частиц имеет размер между 100–400 мкм. Средние размеры (полусумма наибольшего и наименьшего размера) частиц речного песка (образец 5) лежат в интервале 200–800 мкм. Размеры частиц порошка СТ-10 существенно меньше, чем у предыдущих образцов. Основная доля частиц (около 80% массы) имеет средние размеры 4–12 мкм.

Также с малым шагом изменения влажности была измерена КДП двух образцов естественных почв, взятых из одного шурфа с разной глубины. Гранулометрический состав почв (по методу Н.А. Качинского) приведен в табл. 2. Образцы незначительно отличались содержанием физической глины (частиц размерами менее 0.01 мм). Содержание гумуса в образце б составляет 6.6% (по массе), а в образце 7–0.6%.

Результаты рентгенофазового и ИК-спектроскопического анализов образца б показали, что в нем доминирует кварц ~ 55%, присутствуют полевые шпаты ~ 25% (плагиоклаз ~ 20% , и калиевый полевой шпат ~ 5%), слюда диоктаэдрическая (мусковитового типа) ~ 5%, каолинит ~ 3–5%, смектит ~ 2–3%, органика ~ 6%.

Для измерения диэлектрической проницаемости исследуемые образцы размещались в ячейках, представляющих собой отрезки коаксиальных ли-

**Рис. 1.** Форма и размеры частиц исследуемых образцов: а – порошок СТ-10 (образец 5); б – кварцевые гранулы 10–50 мкм (образец 1); в – кварцевые гранулы 50–100 мкм (образец 2); з – речной песок (образец 4).

**Таблица 2.** Гранулометрический состав почв (в % от массы сухой почвы)

Образец	Размер фракций, мм						
	1–0.25	0.25–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001	<0.01
6	2.20	43.80	17.90	4.20	1.40	30.50	36.10
7	0.80	27.24	28.03	3.86	5.22	34.80	43.88

ний длиной от 2 до 11 см. Нужная длина выбиралась в зависимости от влажности образца и диапазона частот, в котором производились измерения. В диапазоне частот 0.1–4 ГГц модуль и фаза коэффициента передачи ячейки измерялись с помощью векторного измерителя параметров цепей ZVRE, а в диапазоне частот 4–8 ГГц измерялись модули коэффициентов отражения и передачи с помощью панорамного измерителя P2-103. Погрешность измерения КДП образца зависит от его влажности, длины ячейки и частоты. Погрешность измерения действительной части КДП с помощью ZVRE изменялась по диапазону частот от 6–9% на частоте 0.1 ГГц до 2–3% на частоте 4 ГГц, мнимой части – от 10–20% на частоте 0.1 ГГц до 2–5% на частоте 4 ГГц. В диапазоне частот 4–8 ГГц погрешность измерений действительной части КДП с помощью P2-103 составляла не более 5% для сухих образцов и не более 10% для влажных. Погрешность измерения мнимой части в этом диапазоне частот составляла от 10 до 20%.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Измерения КДП влажных образцов с малым шагом изменения влажности показали, что зависимости от влажности  $W$  действительной и мнимой частей показателя преломления образцов  $\hat{n} = n + jk = \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''}$  можно аппроксимировать кусочно-ломаными линиями. На рис. 2 приведены такие зависимости  $n(W)$  и  $k(W)$  в области значений влажности, меньших, чем НВ для кварцевых порошков из сферических гранул (образцы 1–3), а на рис. 3 – для речного песка (образец 4) и порошка СТ-10 (образец 5) на двух частотах. Видно, что изломы на характеристиках  $k(W)$  выражены сильнее, чем на характеристиках  $n(W)$ . Влажности, соответствующие точкам перегиба и обозначенные через  $W_i$  на зависимостях  $n(W)$  и  $k(W)$ , уменьшаются при увеличении размера кварцевых гранул (рис. 2) на частоте ГГц от 0.15 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> для образца 1 до 0.11 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> для образца 3. При уменьшении частоты от 3.1 до 0.5 ГГц влажность точки перегиба уменьшается на 20–30%. На графиках, приведенных на рис. 3, для речного песка и порошка СТ-10 такой зависимости  $W_i$  от частоты не наблюдается.

В рамках рефракционной модели диэлектрической проницаемости влажных смесей (Комаров, Миронов, 2000; Mironov, Dobson et al., 2004) посто-

янство наклона зависимостей  $n(W)$  и  $k(W)$  в определенном интервале влажностей можно трактовать как постоянство диэлектрических свойств воды, поэтому можно сделать вывод о том, что в образцах имеются две формы воды, имеющие разную диэлектрическую проницаемость. Следует сделать оговорку, что определяемые с помощью той или иной модели смеси значения  $n$  и  $k$  разных форм воды, строго говоря, являются параметрами модели, а не истинными значениями (Беляева, Бобров, 2004; Бобров, Бобров, 2006). Однако никаким другим способом, кроме использования какой-либо модели смеси, определить диэлектрические свойства воды в дисперсной среде невозможно. Как показано в работах (Mironov, Bobrov, 2003; Mironov, Dobson, 2004; Бобров, Миронов, 2008; Mironov, Kosolapova, 2009), рефракционная модель позволяет определять диэлектрическую проницаемость почв с точностью, вполне достаточной для решения задач ДЗ в диапазоне частот 0.5–12 ГГц, поэтому ниже мы используем эту модель.

В соответствии с рефракционной моделью зависимость показателя преломления образца от его влажности  $W$  можно выразить следующим образом:

$$\begin{cases} n = n_d + (n_1 - 1)W & W \leq W_i \\ n = n_d + (n_1 - 1)W_i + (n_2 - 1)(W - W_i) & W > W_i \end{cases}, \quad (1)$$

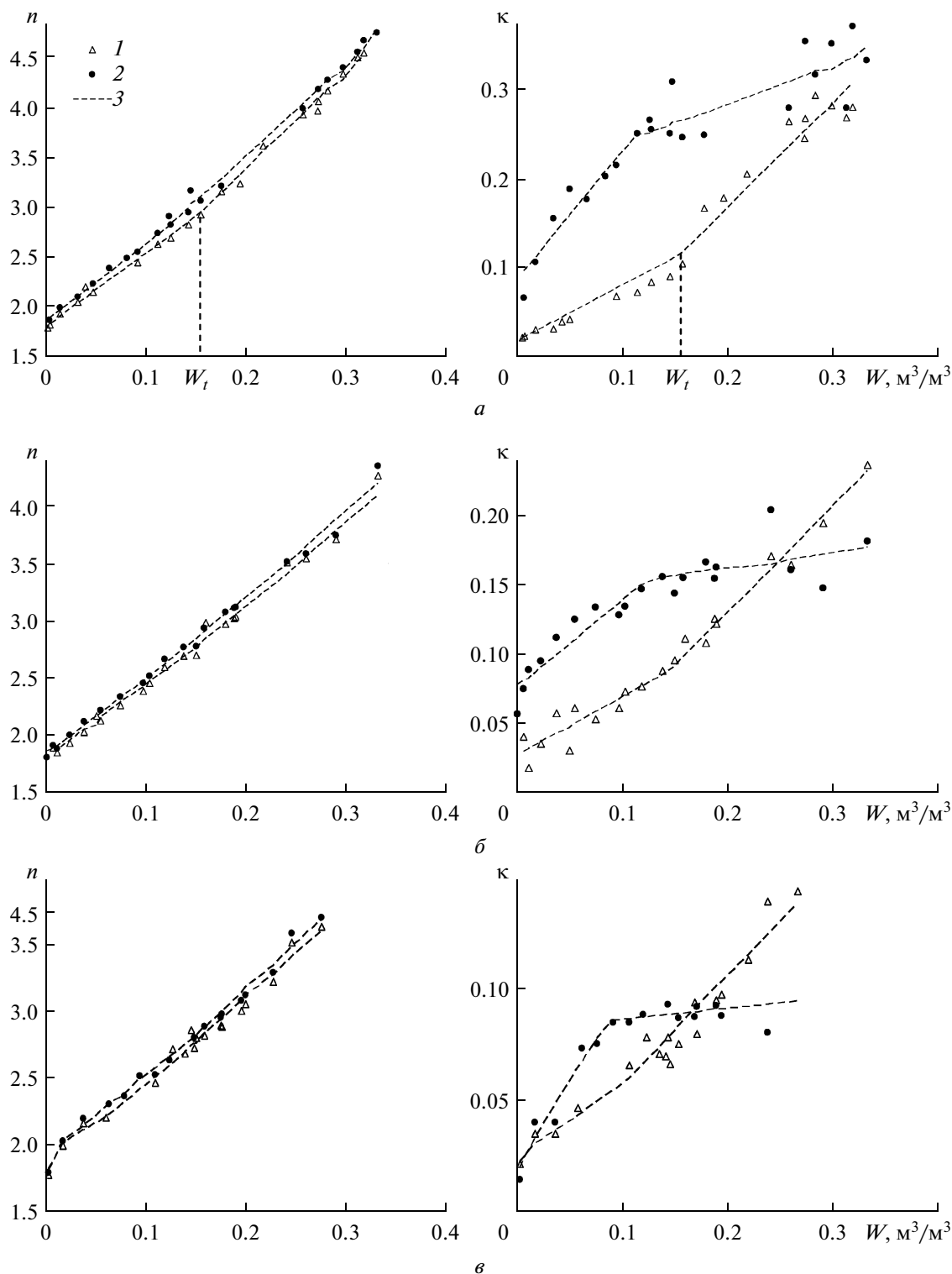
$$\begin{cases} k = k_d + k_1W & W \leq W_i \\ k = k_d + k_1W_i + k_2(W - W_i) & W > W_i \end{cases}, \quad (2)$$

где  $n_d, n_1, n_2$  и  $k_d, k_1, k_2$  – значения действительной и мнимой частей показателей преломления. Индексы  $d, 1, 2$  в (1) и (2) относятся к сухой почве и двум формам воды в образцах, соответственно, а  $W_i$  обозначает значение влажности, соответствующее точке перегиба влажностной зависимости  $n$  и  $k$ . Зависимость действительной и мнимой частей показателя преломления сухой почвы от плотности сухого сложения образца можно представить также рефракционной моделью

$$n_d = 1 + (n_m - 1)\rho/\rho_m; \quad (3)$$

$$k_d = k_m\rho/\rho_m, \quad (4)$$

где  $n_m$  и  $k_m$  – значения действительной и мнимой частей показателя преломления твердой фазы смеси,  $\rho_m$  – плотность твердой фазы и  $\rho$  – плотность сухого сложения. Дело в том, что при экспериментальных измерениях не удается поддерживать по-



**Рис. 2.** Зависимость действительной и мнимой частей показателей преломления порошков из кварцевых гранул от объемной влажности: *a* – образец 1; *б* – образец 2; *в* – образец 3. 1 – на частоте 3.1 ГГц; 2 – на частоте 0.5 ГГц; 3 – расчет по рефракционной модели.

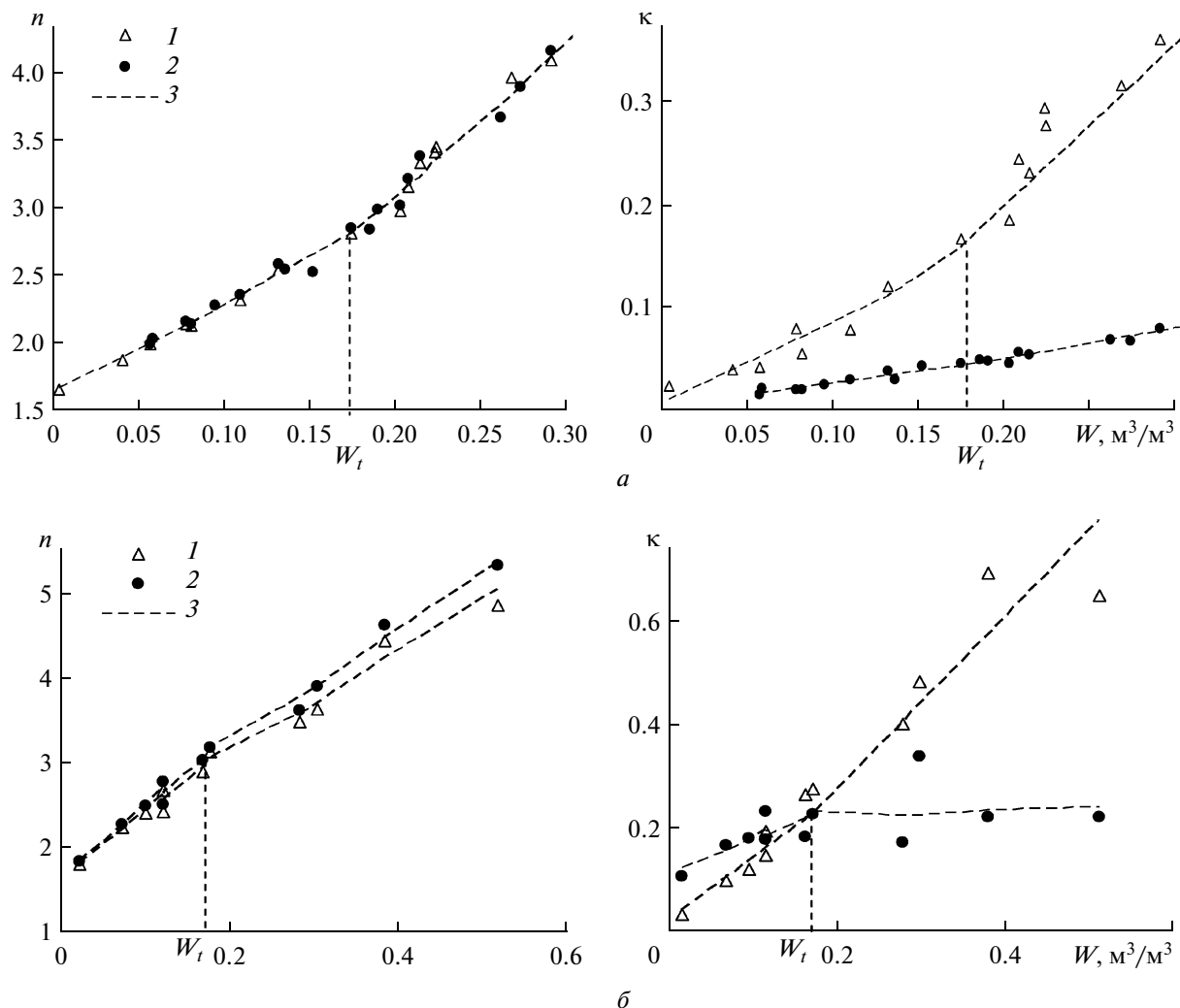


Рис. 3. Зависимость действительной и мнимой частей показателей преломления от объемной влажности: а – образец 4 (1 – на частоте 3.5 ГГц; 2 – на частоте 0.5 ГГц; 3 – расчет по рефракционной модели); б – образец 5 (1 – на частоте 7.6 ГГц; 2 – на частоте 0.8 ГГц; 3 – расчет по рефракционной модели).

стоянной плотность сухого сложения образцов разной влажности, а формулы (3) и (4) позволяют хотя бы частично учесть влияние плотности сухого сложения на КДП почв при различных влажностях.

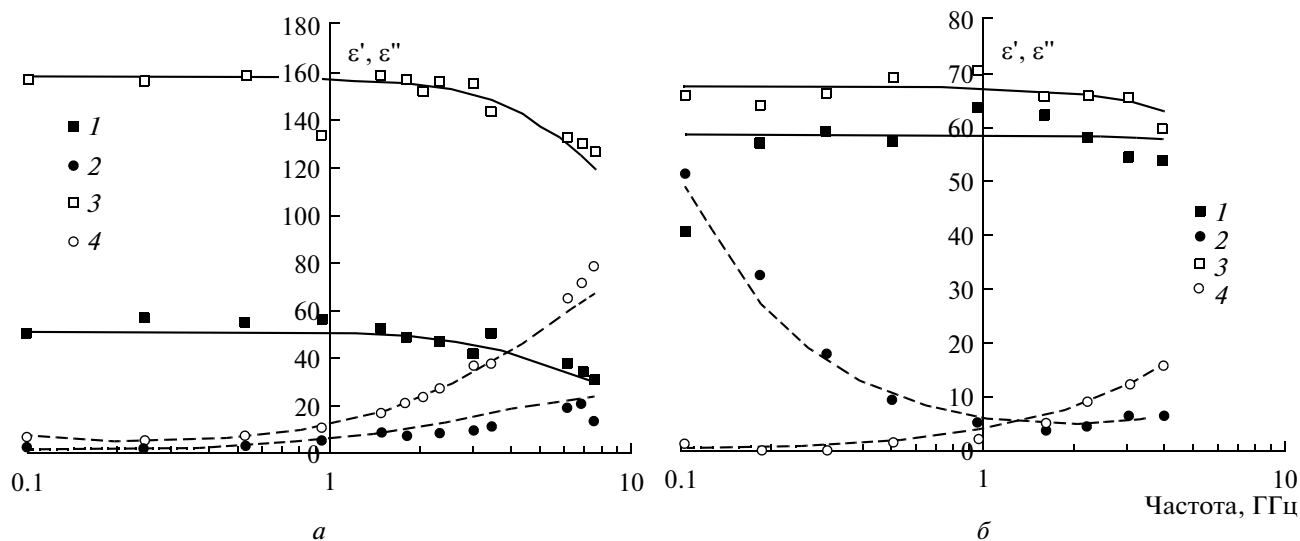
Параметры модели подбирали для наилучшего соответствия экспериментальным данным методом наименьших квадратов. Погрешность определения  $n_1, n_2, \kappa_1$  и  $\kappa_2$  оценивали методом Монте-Карло. Для этого случайным образом в пределах погрешности измерений изменяли полученные в эксперименте значения  $n$  и  $\kappa$ , а затем находили средние значения  $n_1, n_2, \kappa_1$  и  $\kappa_2$ . Относительные стандартные отклонения составили на частотах ниже 4 ГГц 3–5% для  $n_1$ , 3–8% для  $n_2$  и 3–8% для  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$ . После определения действительной и мнимой частей показателей преломления находились действительная и мнимая части КДП двух форм воды:  $\epsilon'_i = n_i^2 - \kappa_i^2$  и  $\epsilon''_i = 2n_i\kappa_i$ , где

$i = 1, 2$ . Относительная погрешность определения этих величин значительно больше, чем погрешность определения  $n$  и  $\kappa$ , особенно в случаях, когда значения  $\kappa$  приближаются к значениям  $n$ , и составляет 7–17%.

На рис. 4 приведены частотные зависимости  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  двух форм воды в речном песке (образец 4) и в кварцевых гранулах (образец 2). Частотные зависимости КДП двух форм воды могут быть представлены в виде формул Дебая для проводящих жидкостей:

$$\hat{\epsilon}_i = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_{0i} - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau_i} + j \frac{\sigma_i}{\omega\epsilon_r},$$

где  $\hat{\epsilon}_i$  – КДП двух форм почвенной влаги: при  $W < W_t$  ( $i = 1$ ) и при  $W > W_t$  ( $i = 2$ ),  $\epsilon_{0i}, \tau_i$  – статические диэлектрические проницаемости и времена релак-



**Рис. 4.** Частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости двух форм воды: *a* – в речном песке (образец 4); *б* – в кварцевом порошке (образец 2). 1, 2 – действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости воды при малой влажности ( $W < W_t$ ), соответственно; 3, 4 – действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости воды при влажности ( $W > W_t$ ); линии – расчет по модели Дебая.

сацией двух форм воды,  $\varepsilon_\infty = 4.9$  – высокочастотная диэлектрическая проницаемость,  $\omega$  – циклическая частота,  $\varepsilon_r = 8.854 \times 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая постоянная,  $\sigma_i$  – ионная удельная проводимость.

Была исследована также возможность применения модели Гаврильяка-Негами, которая с учетом ионной проводимости имеет вид:

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{\left[1 + (j\omega\tau)^\gamma\right]^\beta} + j \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_r},$$

где  $\gamma$  и  $\beta$  – коэффициенты, имеющие значения от 0 до 1. На примере двух образцов было выяснено, что применение этой модели позволяет уменьшить сумму квадратов разностей между экспериментальными и расчетными данными на 25–30% (при минимизации методом наименьших квадратов), или уменьшить максимальные отклонения экспериментальных данных от расчетных на 5–13% (при использовании минимаксного метода). Эти значения отклонений практически не превышают по-

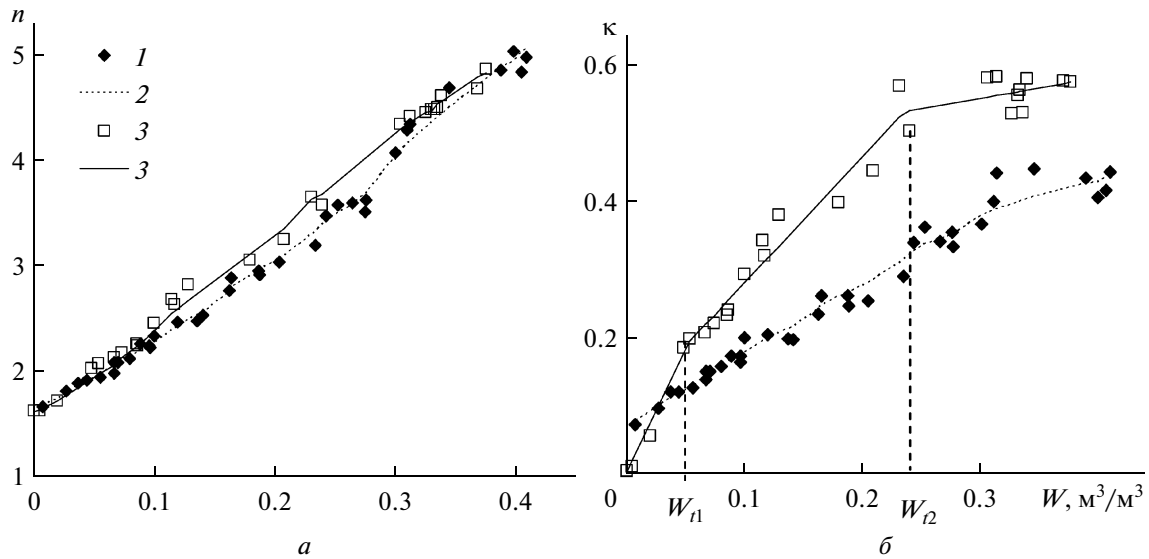
грешностей определения  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$ . Поэтому ниже используется модель Дебая, требующая определения меньшего числа параметров.

Результаты расчетов КДП по модели Дебая показаны на рис. 4 сплошными линиями для  $\varepsilon'$  и штриховыми для  $\varepsilon''$ . Параметры модели Дебая, подобранные для наилучшего соответствия экспериментальным результатам, полученным для всех исследованных образцов, приведены в табл. 3. Значения высокочастотной проницаемости  $\varepsilon_\infty$  не подбирались, а во всех случаях принимались равными 4.9.

Из этих данных следует, что формы воды в исследованных образцах отличаются по своим диэлектрическим характеристикам от свободной воды. Статическая проницаемость  $\varepsilon_{01}$  первой формы воды (при малой влажности) в кварцевых порошках с крупными гранулами (образец 3) и речном песке (образец 4) имеет низкое значение, лишь не намного превышающее среднее значение для связанной воды, изменяющееся в разных типах почв от 22 до

**Таблица 3.** Параметры модели Дебая двух форм воды в образцах 1–5

№	Образец	Вода при влажности $W < W_t$			Вода при влажности $W > W_t$		
		$\varepsilon_{01}$	$\tau_1$ , пс	$\sigma_1$ , См/м	$\varepsilon_{02}$	$\tau_2$ , пс	$\sigma_2$ , См/м
1	Кварц. гранулы 10–50 мкм	$72 \pm 4$	$5.6 \pm 0.8$	$0.59 \pm 0.12$	$102 \pm 8$	$11 \pm 2$	$0.20 \pm 0.04$
2	Кварц. гранулы 50–100 мкм	$58 \pm 3$	$4.1 \pm 0.8$	$0.27 \pm 0.05$	$67 \pm 5$	$11 \pm 2$	$0 \pm 0.01$
3	Кварц. гранулы 100–400 мкм	$48 \pm 3$	$3.8 \pm 0.8$	$0.29 \pm 0.05$	$66 \pm 5$	$11 \pm 2$	$0 \pm 0.01$
4	Речной песок	$51 \pm 3$	$15.3 \pm 2.9$	$0.02 \pm 0.01$	$152 \pm 12$	$12 \pm 2$	$0.03 \pm 0.01$
5	Порошок СТ-10	$90 \pm 5$	$6.5 \pm 0.8$	$0.42 \pm 0.08$	$52 \pm 4$	$10 \pm 2$	$0 \pm 0.01$



**Рис. 5.** Зависимость показателей преломления естественных суглинков от объемной влажности на частоте 1.4 ГГц: *a* – действительной части; *b* – мнимой части. 1, 3 – экспериментальные данные для образцов 6 (с высоким содержанием гумуса) и 7 соответственно; 2, 4 – расчет по рефракционной модели для образцов 6 и 7, соответственно. Для образца 7 показаны значения влажности, соответствующие точкам перегиба.

40 (Бобров, Миронов, 2008). При уменьшении размеров кварцевых гранул (образцы 1, 2) статическая проницаемость  $\epsilon_{01}$  возрастает и в образце 1 значительно превышает значение статической проницаемости связанной воды. По-видимому, эту форму воды можно отнести к категории рыхлосвязанной.

Подобная тенденция возрастания наблюдается и у статической проницаемости  $\epsilon_{02}$ , причем в образцах 1 и 4 она значительно выше статической проницаемости свободной воды, равной 79.3 при 22°C. В образцах 2 и 3 статическая проницаемость  $\epsilon_{02}$  второй формы воды немного меньше, чем статическая проницаемость свободной воды.

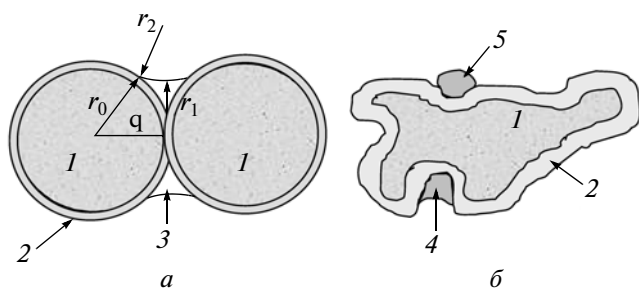
Различие в значениях статической проницаемости  $\epsilon_{02}$  и  $\epsilon_{01}$  двух форм воды в образце 2 невелико и не намного превышает погрешность определения этих величин, однако эти две формы влаги существенно различаются по значениям мнимой части показателя преломления  $\kappa(W)$  (рис. 2). Видно, что наклоны влажностной зависимости  $\kappa(W)$  у разных форм воды различаются существенно, кроме того, различной является и частотная зависимость  $\kappa$ . Мнимая часть КДП первой формы воды (при малой влажности) возрастает при уменьшении частоты (см. рис. 4б), что объясняется относительно высокой удельной проводимостью  $\sigma_1 = 0.27$  (см. табл. 3), а мнимая часть КДП воды при влажности  $W > W_t$  уменьшается при уменьшении частоты из-за проводимости  $\sigma_2 \approx 0$ . Подобными свойствами обладают обе формы воды и в образце 3.

Существенно различаются статические проницаемости  $\epsilon_{02}$  и  $\epsilon_{01}$  двух форм воды в речном песке и

порошке СТ-10 (рис. 3). В речном песке (образец 4) проницаемость  $\epsilon_{01}$  примерно такая же, как и в порошках крупных кварцевых гранул (образцы 2 и 3), однако  $\epsilon_{02}$  выше, чем в порошке самых мелких гранул (образец 1). Обратная ситуация в порошке СТ-10 (образец 5). При возрастании влажности от 0 до  $0.19 \text{ м}^3/\text{м}^3$  наблюдается более быстрый рост показателя преломления, чем при увеличении влажности свыше  $0.19 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Здесь статическая проницаемость  $\epsilon_{01}$  воды при малой влажности значительно выше, чем проницаемость  $\epsilon_{02}$  воды при влажности  $W > W_t$  и превышает соответствующее значение для свободной воды. Скорее всего, это объясняется тем, что кварц является гидрофильным, а сополимер СТ-10 – гидрофобным, поэтому при малой влажности вода в порошке СТ-10 может находиться только в капельной форме.

Следует отметить также различие в удельных проводимостях двух форм воды – вода второй формы имеет близкую к нулю проводимость. Пока непонятно, почему даже при учете погрешностей времени релаксации воды первой формы в кварцевых гранулах меньше, чем у свободной воды (8.77 пс при 22°C). Скорее всего, это эффект применения рефракционной модели (см. выше).

На рис. 5 приведены зависимости  $n(W)$  и  $\kappa(W)$  для естественных почв (образцы 6, 7) на частоте 1.4 ГГц. Видно, что в этих почвах имеется небольшое количество прочно связанной воды (влажность менее  $W_{t1}$ ). Объемная доля этой воды составляет  $0.1 \text{ м}^3/\text{м}^3$  в образце 6 и  $0.05 \text{ м}^3/\text{м}^3$  в образце 7. Диэлектрические свойства связанной воды изучены



**Рис. 6.** Схема распределения форм влаги: *а* – при сферических частицах; *б* – при частицах неправильной формы. 1 – почвенные частицы, 2 – слой прочно связанной воды, 3 – стыковая вода, 4 и 5 – вода капиллярной конденсации (по Н.А. Качинскому), с отрицательной 4 и положительной 5 кривизной поверхности.

достаточно хорошо (Бобров, Миронов, 2008; Mironov, Kosolapova, 2009), поэтому здесь мы их не обсуждаем. При увеличении влажности более  $W_1$  наклон зависимости  $n(W)$  возрастает, а  $\kappa(W)$  – уменьшается. При этом наклоны  $n(W)$  в обоих образцах практически одинаковы, то есть действительная часть КДП этой формы воды (назовем ее стыковой) в обоих образцах также одинакова и на частоте 1.4 ГГц имеет значение  $\varepsilon_1' = 72$ , а мнимые части различаются: для образца 6 (с высоким содержанием гумуса)  $\varepsilon_1'' = 16.6$  и для образца 7  $\varepsilon_1'' = 34.6$ . Таким образом, диэлектрические свойства стыковой воды в почвах близки к свойствам воды при  $W < W_1$  в образце 1 (кварцевые гранулы с наименьшим размером частиц). На частоте 1.4 ГГц в этом образце  $\varepsilon_1' = 71.2$ , а  $\varepsilon_1'' = 13.7$ .

Диэлектрические свойства воды при влажности выше второй точки перегиба ( $W > W_2$ ) различаются сильнее. Действительная и мнимая части для образца 6 равны  $\varepsilon_2' = 120$ ,  $\varepsilon_2'' = 13.0$  и для образца 7 –  $\varepsilon_2' = 103$ ,  $\varepsilon_2'' = 3.5$ . Возможно, это связано с наличием мелких пор в веществе гумуса, покрывающего поверхность почвенных частиц.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предпримем попытку объяснить рассмотренные отличия в диэлектрических характеристиках разных форм влаги в образцах, учитывая кривизну поверхности границы вода–воздух.

Исследованные образцы речного песка и кварцевых гранул состоят из достаточно крупных частиц и имеют небольшую удельную поверхность, поэтому содержат небольшое количество прочно связанной воды, распределенной по поверхности почвенных частиц слоем толщиной в несколько молекулярных диаметров (Качинский, 1970). Максимальная объемная доля этой воды не превышает 0.010–

0.0150 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Наличие такого количества прочно связанной влаги практически не сказывается на значениях экспериментально определенных показателей преломления. Основная часть воды находится в форме водных манжет (стыковая или менисковая вода) на стыках почвенных частиц и в виде капель капиллярной конденсации на неровностях поверхности крупных почвенных частиц, при этом свободная граница (вода–воздух) может быть как вогнутой, так и выпуклой (рис. 6).

Оценим влияние искривления свободной поверхности воды на ее диэлектрическую проницаемость. Вода под искривленной поверхностью испытывает избыточное давление  $\Delta P$ , которое положительно в случае выпуклой поверхности и отрицательно в случае вогнутой поверхности. При этом плотность ее изменяется на  $\Delta \rho = \rho_0 \Delta P K$ , где  $\rho_0$  – плотность воды с плоской поверхностью;  $K$  – коэффициент изотермического сжатия (для воды он равен  $4.96 \times 10^{-10}$  Па<sup>-1</sup>);  $\Delta P = \eta(1/r_1 + 1/r_2)$  – избыточное давление Лапласа для случая поверхности с двойной кривизной ( $r_1$  и  $r_2$  – главные радиусы кривизны поверхности;  $\eta$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости).

При малых влажностях свободная граница менисковой воды имеет отрицательную кривизну, давление Лапласа отрицательно и плотность жидкости меньше, чем плотность свободной воды. Это приводит к уменьшению статической диэлектрической проницаемости воды. Для оценки статической диэлектрической проницаемости воды важна упаковка твердых частиц и их форма. Простейший случай, рассмотренный в литературе (Нерпин, Чудновский, 1986; Шукин, Перцов и др., 2006), позволяет учесть радиусы кривизны поверхности жидкости, формирующейся в стыках двух одинаковых сферических частиц радиуса  $r_0$  (рис. 6). Радиусы  $r_1$  и  $r_2$  можно рассчитать по формулам:  $r_1 = r_0(1 + \tan \theta - 1/\cos \theta)$  и  $r_2 = -r_0(1/\cos \theta - 1)$ , где  $\theta$  – полярный угол, показанный на рис. 6.

Расчет статической диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{0e}$  воды в зависимости от ее плотности произведем по формуле Клаузиуса–Мосотти

$$\frac{\varepsilon_{0e} - 1}{\varepsilon_{0e} + 2\rho_e} \frac{\mu}{\varepsilon_r} = \frac{1}{3} \frac{N_A}{\varepsilon_r} \alpha_e, \quad (5)$$

где  $\mu$  – молярная масса воды,  $\rho_e$  – плотность воды,  $\alpha_e$  – поляризуемость молекулы воды,  $N_A$  – число Авогадро.

При изменении количества воды радиусы кривизны  $r_1$  и  $r_2$  будут меняться. Для твердых частиц разного радиуса  $r_0$  при одинаковом количестве воды значения  $r_1$  и  $r_2$  будут разными. Расчетная объемная доля менисковой воды зависит от размеров твердых частиц и достигает 0.22–0.26 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> для образцов из кварцевых гранул с размерами частиц, указанными в табл. 3.



Расчеты с использованием формулы (5) показывают, что существенное влияние отрицательной кривизны поверхности на уменьшение статической диэлектрической проницаемости менисковой воды может наблюдаться в исследованных образцах кварцевых гранул при влажностях менее  $0.03\text{--}0.04\text{ м}^3/\text{м}^3$ , что составляет около четверти объема воды первой формы в песке и кварцевых гранулах. Таким образом, давление Лапласа лишь частично объясняет уменьшение статической проницаемости  $\epsilon_{01}$  воды при влажностях  $W < W_c$ . По-видимому, существенную роль играет также взаимодействие с поверхностью твердых почвенных частиц, поэтому такую воду называют рыхлосвязанной. В некоторых работах, например (Чудинова, 2009), уменьшение диэлектрической проницаемости менисковой воды объясняется исключительно действием поверхностных сил.

Если вода в образцах существует в виде капель сферической формы радиуса  $r_1$ , она находится под избыточным давлением Лапласа  $\Delta P = 2\eta/r_1$ . В этом случае  $\Delta P > 0$  и  $\Delta r > 0$ , поэтому с уменьшением радиуса капли ее плотность и диэлектрическая проницаемость растут. Максимальные размеры капель воды определяются размерами пор. В случае упаковки твердых сферических частиц радиуса  $r_0$  в кубические ячейки со стороной  $r_0$  в пространство между частицами можно вписать жидкие капли, радиус  $r_1$  которых можно выразить через радиус твердых частиц следующим образом:  $r_1 = r_0(\sqrt{2} - 1)$ . В случае тетраэдральной упаковки радиус вписанных жидких капель определяется по формуле  $r_1 = r_0(2/\sqrt{3} - 1)$ . Таким образом, максимальные радиусы капель составляют  $(0.18\text{--}0.41)r_0$ .

Расчет показывает, что заметное увеличение статической проницаемости воды происходит только при очень малых радиусах капель ( $\epsilon_{0e} = 83.6$ , при  $r_1 = 0.1$  мкм и  $\epsilon_{0e} = 131$ , при  $r_1 = 0.01$  мкм). Судя по экспериментальным данным, приведенным в табл. 4, такие капли могут существовать в порошке СТ-10 при малой влажности ( $W < W_c$ ). Материал СТ-10 является гидрофобным, и вода при малой влажности не растекается по поверхности частиц, а образует капли со свободной поверхностью. Поскольку размеры частиц в этом образцы малы, то и капли имеют малые радиусы.

Вероятность существования свободных капель воды в кварцевых образцах невелика, так как кварц является гидрофильным материалом, однако на поверхности частиц при достаточно большой влажности могут возникать капли с положительной кривизной границы воздух-вода. Поскольку реальные почвенные частицы (в нашем случае это речной песок и естественные почвы) имеют сложную форму, радиусы кривизны их поверхностей могут быть весьма малыми, то и капельная вода может иметь

достаточно малые радиусы кривизны, приводящие к возрастанию статической диэлектрической проницаемости второй формы воды при  $W > W_c$  по сравнению с диэлектрической проницаемостью свободной воды. Наибольшее возрастание диэлектрической проницаемости этой формы воды наблюдается в почве с высоким содержанием гумуса, что, возможно, объясняется наличием большого количества мелких пор в гумусе, вещества которого могут обладать как гидрофильными так и гидрофобными свойствами. Считая, что все поры одинаковы, можно оценить их минимальный размер по диаметру капель воды. Диэлектрической проницаемости капельной воды, равной 152 соответствуют диаметры капель, равные 0.017 мкм. Аналогичный расчет для размера пор в порошке СТ-10 дает значение 0.08 мкм.

В порошках из крупных сферических гранул вторая форма воды, хотя и имеет статическую диэлектрическую проницаемость больше, чем у первой формы, все-таки меньше, чем проницаемость свободной воды. Предположительно, это объясняется одновременным существованием менисков, как с положительной, так и с отрицательной кривизной свободной поверхности.

Сравнение полученных нами значений влажностей  $W_2$  для почвенных образцов 6 и 7 ( $0.25\text{--}0.26\text{ м}^3/\text{м}^3$ ) с данными диэлектрических измерений на частоте 50 МГц, приведенными в (Чудинова, 2009), а также с диаграммами термодинамического состояния воды (Воронин, 1990) позволяет сделать вывод, что эта точка перегиба близка к максимальной молекулярной влагоемкости (ММВ), то есть к точке появления капиллярной влаги.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что основу воды первой формы составляет стыковая (или менисковая) вода с отрицательной кривизной поверхности. Вода, имеющая выпуклые свободные поверхности в виде капель или линз на поверхности почвенных частиц, составляет основу воды второй формы, у которой статическая диэлектрическая проницаемость превышает статическую проницаемость свободной воды (как в образцах 1 и 4) или близка к ней (как в образцах 2 и 3).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения диэлектрической проницаемости капиллярно-менисковой воды в увлажненных кварцевых порошках и естественных почвах показали, что в почвах и влажных смесях отсутствует вода, идентичная свободной воде по своей диэлектрической проницаемости. В диапазоне влажностей, меньших НВ, по диэлектрическим характеристикам, кроме прочно связанной воды, можно выделить еще две формы. Первая из них существует в виде стыковой или менисковой воды с отрицательной кривизной свободной поверхности, и ее можно от-

нести к категории рыхлосвязанной. Вторая форма имеет статическую диэлектрическую проницаемость больше, чем свободная вода, и может существовать в виде сферических капель в гидрофобных средах или в виде мелких капель (линз) с положительной кривизной на поверхности почвенных частиц. Найденные частотные зависимости КДП этих форм воды показали, что их диэлектрические свойства удовлетворительно описываются моделью Дебая. Путем сравнения характеристик исследованных почв с почвами подобных типов, для которых в работах (Воронин, 1990, Чудинова, 2009) приведены почвенные гидрологические константы и границы смены категорий почвенной влаги, найдено, что точка перегиба на зависимостях  $n(W)$  и  $\kappa(W)$  близка к максимальной молекулярной влагоемкости (ММВ).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беляева Т.А., Бобров А.П., Бобров П.П. и др.* Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0.1–20 ГГц // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 5. С. 28–34.
- 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. 2-й Всерос. открытой конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. 16–18 ноября 2004 г. Москва: ИКИ РАН, 2004. С.181.
- Бобров А.П., Бобров П.П., Ивченко О.А., Мандрыгина В.Н.* Определение диэлектрической проницаемости прочно- и рыхлосвязанной воды на СВЧ с использованием емкостной модели диэлектрической проницаемости почв // Вестн. ОмГПУ. Вып. 2006. Омск: электронный ресурс. <http://www.omsk.edu/article/vestnik-omgpu-149.pdf>
- Бобров П.П., Миронов В.Л., Ивченко О.А., Красноухова В.Н.* Спектроскопическая модель диэлектрической проницаемости почв, использующая стандартизованные агрофизические показатели // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 1. С. 15–23.
- Воронин А.Д.* Энергетическая концепция физического состояния почв // Почвоведение. 1990. № 5. С. 7–19.
- Качинский Н.А.* Физика почвы. Часть 2. М.: Высшая школа, 1970.
- Комаров С.А., Миронов В.Л.* Микроволновое зондирование почв. Новосибирск: Наука, 2000. 350 с.
- Лещанский Ю.И., Лебедева Г.Н., Шумилин В.Д.* Электрические параметры песчаного и глинистого грунтов в диапазоне сантиметровых, дециметровых и метровых волн // Изв. вузов. Радиофизика. 1971. Т. 14. № 4. С. 562–569.
- Нерпин С.В., Чудновский А.Ф.* Энерго- и массообмен в системе растение–почва–воздух. Л.: Госметеиздат, 1986. 361 с.
- Чудинова С.М.* Диэлектрические показатели почвы и категории почвенной влаги // Почвоведение. 2009. № 4. С. 441–451.
- Шукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А.* Коллоидная химия. М.: Высш. шк., 2006. 444 с.
- Curtis, J.O., Weiss C.A. Jr., Everett, J.B.* Effect of Soil Composition on Dielectric Properties // Technical Report EL-95-34. U.S. Army Corps of Engineers. Waterways Experimental Station. Vicksburg, MS, 1995.
- Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T. et al.* Microwave dielectric behavior of wet soil. Part II: Dielectric mixing models // IEEE Trans. Geosci Rem. Sens. 1985. V. GE-23. № 1. P. 35–45.
- Mironov V.L., Bobrov P.P.* Soil dielectric spectroscopic parameters dependence on humus content // Proc. IGARSS'03. Toulouse, France, 2003. V. 2. P. 1106–1108.
- Mironov V.L., Dobson M.C., Kaupp V.H. et al.* Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2004. V. 42. № 4. P. 773–785.
- Mironov V.L., Kosolapova L.G., Fomin S.V.* Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. V. 47. № 7. Part 1. 2009. P. 2059–2070.

## Dielectric Properties of Capillary–Meniscus Soil Water

T. A. Belyaeva, P. P. Bobrov, O. V. Kondratyeva, A. V. Repin

Omsk State Pedagogical University, Omsk

The results of complex permittivity measurements of spherical silica granules powders, powders of hydrophobic dielectric, river sand and two samples of natural soils, moistened by distilled water, at the frequency range of 0.1–8 GHz are presented. It is found that when soil moisture is less than field capacity, in the soils in addition to firmly bound water it can be distinguish two forms of water with different permittivity. It is shown that the permittivity of these two forms of water depends on the physical properties of minerals, the shape and the size of soil particles. The parameters of the Debye model for these forms of water have been determined. Possible causes leading to a change in permittivity of water in contact with soil particles have been considered. It is found that transient moisture from one form to another close to the maximum molecular capacity.

**Keywords:** dielectric constant, wet mixtures, microwaves, categories of soil water, remote sensing