

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ПЕРКОЛЯЦИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ИЗМЕНЕНИЙ ВЛАЖНОСТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ СРЕД

© 2011 г. Г. С. Бордонский*, А. О. Орлов

Учреждение Российской академии наук Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита
E-mail: lgc255@mail.ru

Поступила в редакцию 05.05.2010 г.

Исследованы влажностные зависимости электрических свойств увлажненного песка на частотах 100 кГц и 13.5 ГГц. Установлено, что в точке перколяции, когда в среде исчезает сквозная проводимость, наблюдается существенное изменение диэлектрических свойств как на низких, так и на сверхвысоких частотах. Критическое значение влажности разделяет две области с различными электрическими параметрами, однако свойства поровой воды могут не изменяться. Этим эффектом можно объяснить возникновение отраженных сигналов от внутренних слоев относительно однородных земных покровов при радарных измерениях.

Ключевые слова: перколяционный порог, увлажненный песок, диэлектрическая проницаемость, микроволновый диапазон

ВВЕДЕНИЕ

Детальное знание электромагнитных параметров увлажненных дисперсных сред необходимо при интерпретации данных дистанционного зондирования (ДЗ) почв, грунтов, увлажненного снежного и ледяного покровов и других пористых объектов. Несмотря на большое число работ по изучению микроволновых свойств таких сред, имеется много неясных вопросов в выборе физических моделей данного объекта.

В статье (Беляева и др., в печати) приведены результаты измерений диэлектрической проницаемости увлажненных порошков и песка в СВЧ-диапазоне в зависимости от их влажности. Авторы обнаружили и исследовали характерную особенность поведения коэффициента преломления, которая заключалась в возможности аппроксимации графиков зависимостей от влажности двумя прямыми линиями. Изучалась причина изменения наклона графиков, что, по мнению авторов, связано со структурной перестройкой воды в порах. При анализе данных использованы модель Дебая и рефракционная формула для нахождения диэлектрической проницаемости, на основании чего был сделан вывод о существовании двух форм воды. Эти формы воды существуют в различных интервалах влажности, разделяемые значением влажности, близким к точке появления капиллярной влаги.

Следует отметить, что исследования последнего десятилетия привели к открытию новых модификаций льда и воды, особенно для воды в поровом про-

странстве. В настоящее время для объемной воды известны 16 кристаллических модификаций и три модификации аморфного льда, а также стеклообразная вода (Chaplin, 2010). Имеется много сведений о многообразии форм воды в замкнутом поровом пространстве (Takaiwa et al., 2008; Jahnert et al., 2008). Поэтому предположение о возможности существования в увлажненных средах (грунтах, почвах) некоторых структурных модификаций воды представляется правдоподобным. Вместе с тем, многочисленные работы по изучению свойств воды в нанопорах показывают, что при размерах пор более десяти нанометров вода в них при обычных температурах (и выше температуры замерзания объемной воды) не проявляет каких-либо особых структурных особенностей (Jahnert, 2008; Brovchenko et al., 2004). Следовательно, проявление особых структурных форм воды пока другими исследователями не подтверждается. Отметим, что исследования проводились методами рентгеновской и ядерно-магнитно-резонансной спектроскопии (ЯМР-спектроскопии) и при помощи дифференциальной сканирующей калориметрии.

Одной из первых публикаций о билинейной аппроксимации влажностных зависимостей действительной части относительной диэлектрической проницаемости (ϵ') почвы на СВЧ была работа (Сологубова, 1987). Однако в ней обнаруженная особенность детально не рассматривалась. Предполагалось, что точка изменения наклона графика связана с переходом от преобладания свободной воды к связанной воде, электрические свойства которой,

естественно, отличаются от первой. При внимательном рассмотрении полученных данных возникает вопрос, почему этот переход достаточно резок. Можно предположить, что в неоднородной по размерам частиц среде переход от преобладания свободной воды к связанной должен быть сглажен. Авторы работы (Беляева и др., в печати) поставили фактически вопрос о возможной связи наблюдаемого резкого перехода со структурной перестройкой, относящейся к молекулярной структуре воды.

Однако большое число параметров, которые можно заложить в модель среды затрудняет интерпретацию результатов. Авторы (Беляева и др., в печати) использовали относительно простую модель, по которой среда подчиняется теории релаксации Дебая и, дополнительно, вводится проводимость в среде. Справедливость ее применения основывается оценками параметров в более сложной формуле Гаврильяка–Негами, которая учитывает распределение времен релаксации диполей. Оказалось, что более сложная формула не давала существенного изменения искомой диэлектрической проницаемости. В результате в работе (Беляева и др., в печати) сделали вывод о том, что параметры воды существенно отличаются для двух областей влажности, что, следовательно, соответствует проявлению двух форм воды.

Цель данной статьи предложить альтернативное объяснение наблюдавшемуся в работе (Беляева и др., в печати) резкому перегибу графиков коэффициента преломления от влажности, которое основано на явлении перколяции (протекании) в среде. Особенность перколяционной среды — резкое изменение ее свойств, в том числе электрических, при переходе через критическую точку (точку перколяции) (Шкловский, Эфрос, 1970). Критическая точка определяется концентрацией в среде проводящего компонента, а сам переход напоминает фазовый переход. Характерным проявлением перколяционных эффектов является резкое возрастание ряда физических параметров, в том числе действительной части диэлектрической проницаемости по закону (Шкловский, Эфрос, 1970)

$$\varepsilon' \sim 1/|(q - q_0)|^m, \quad (1)$$

где q_0 — значение критического параметра, $m \sim 1$. Если q (например, весовая концентрация жидкости W) превышает q_0 , в среде появляется сквозная проводимость.

МОДЕЛЬ СРЕДЫ

Перколяционный эффект может значительно изменять значения ε' для областей с q выше и ниже критического. Это было показано, например, в работе (Емец, 2002) для перколяционной среды в виде чередующихся цилиндров прямоугольного сечения

(структура шахматной доски). Для структуры, состоящей из проводящей и непроводящей сред, установлено, что $\varepsilon' \rightarrow \infty$, $\varepsilon'' \rightarrow \infty$, $\operatorname{tg} \delta \rightarrow 1$ при стремлении частоты внешнего поля к нулю. Здесь ε'' — мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости, $\operatorname{tg} \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ — тангенс угла диэлектрических потерь.

Можно предположить, что перколяционный эффект имеет место и в увлажненных порошках и других увлажненных мелкодисперсных средах, состоящих из непроводящих частиц. Для таких объектов выше некоторого значения влажности W_0 имеется электрически связанное распределение свободной воды и слои адсорбированной поверхностью частиц воды. Ниже критического значения сквозная проводимость исчезает, и среда при низкой влажности имеет в основном связанную на поверхности частиц воду.

Очевидно, что по мере роста частоты эффект существенного увеличения ε' и ε'' будет исчезать хотя бы из-за влияния индуктивности соединительных проводящих мостиков в среде. Однако оценок перколяционных эффектов для случая увлажненного песка и других увлажненных дисперсных сред на СВЧ не проводилось.

Для обоснования и экспериментальной проверки предлагаемой модели можно использовать особое свойство среды, а именно, скачок восприимчивости в критической точке. Формула (1) выполняется для бесконечного числа элементов. В случае конечного их числа, а также неоднородного распределения проводящих элементов по объему, скачок восприимчивости менее выражен. Тем не менее, наличие скачка ε' при $q = q_0$ ($W = W_0$) может служить аргументом в пользу перколяционного механизма изменения ε' для двух областей влажности: выше и ниже критического значения.

Поэтому нами выполнены эксперименты по измерению зависимости ε' и $\operatorname{tg} \delta$ от W на низких и сверхвысоких частотах и поиске их резкого изменения в критической точке.

ЭКСПЕРИМЕНТ

1. Первоначально выполнялись измерения на относительно низких частотах для доказательства существования перколяционного эффекта при изменении увлажнения данной дисперсной среды при некотором конкретном значении W_0 .

В эксперименте использовали природный песок, который предварительно промывался для удаления солей, из него удалялась ферромагнитная фракция, и он просушивался при температуре $+150^\circ\text{C}$. Увлажнение исследуемого образца осуществлялось дистиллированной водой. Состав песка: 60–70% — полевой шпат, 30–40% — кварц, единицы процентов — другие минералы.

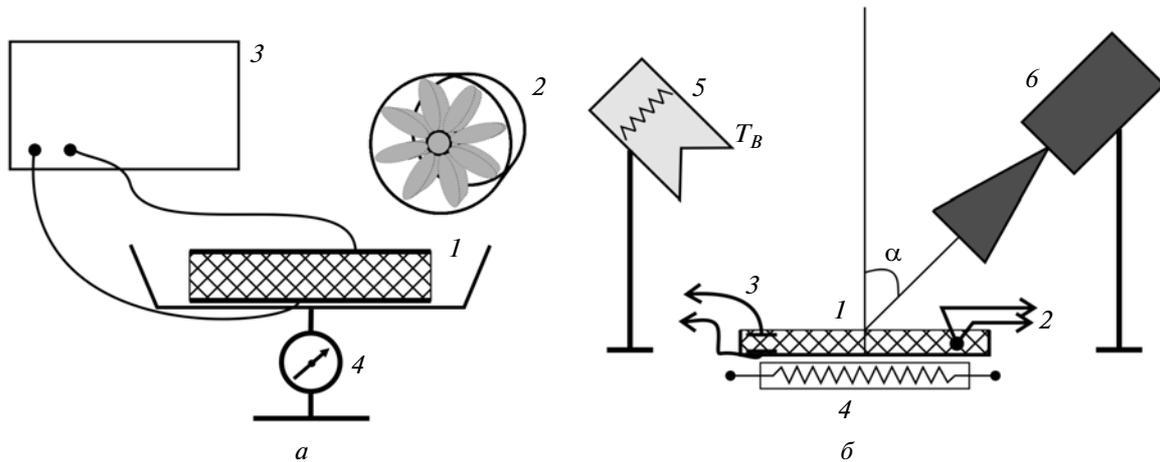


Рис. 1. Схемы установок для измерения влажностных зависимостей электрических параметров сред: *a* – для низкочастотных: 1 – емкостная ячейка с сетчатым верхним электродом, 2 – вентилятор, 3 – измеритель емкости, 4 – весы; *б* – для радиометрических измерений: 1 – кювета с увлажненным песком, 2 – термопара для измерений температуры, 3 – датчик проводимости песка, 4 – нагреватель, 5 – нагреваемый до 500 К эталон черного тела, 6 – СВЧ-радиометр, α – угол наблюдения, равный 45° .

2. Увлажнение изменялось плавно, с быстрой записью электрических параметров среды. Особенность прохождения через критическую точку заключается, как было отмечено в (Бордонский и др., 2006), при низкочастотных измерениях промерзающего песка, в кратковременности скачка ϵ' . Это означает, что при измерениях по точкам с интервалом порядка минут невозможно зарегистрировать сигнал в точке перколяции. В выполненных экспериментах использовали запись со скоростью пять измерений в секунду с использованием системы сбора информации “Agilent”, изменение влажности осуществляли приблизительно со скоростью 5% в час.

3. В экспериментах на СВЧ главной задачей было не точное измерение ϵ' , а изучение относительного изменения некоторого параметра среды, задаваемого диэлектрической проницаемостью. В частности, измеряли зависимость мощности радиотеплового излучения от плоского слоя увлажненной среды. Сигнал состоял из отраженного фонового излучения и собственного излучения образца.

4. Медленное монотонное изменение увлажнения среды от максимального значения влажности до значения, близкого к нулю, достигалось нагреванием образца в течение нескольких часов измерений.

Схемы установок приведены на рис. 1а, 1б.

При низкочастотных измерениях (рис. 1а) выполняли измерения емкости и угла диэлектрических потерь ячейки в виде плоскопараллельных пластин (1), верхняя из них была выполнена из металлической сетки для достижения эффективного испарения воды. Испарение достигалось обдувом с использованием вентилятора (2). Емкостная ячейка имела размеры $30 \times 30 \times 5$ мм. Ячейка располагалась на чаше весов, с помощью которых определялись ее

масса и, в дальнейшем, весовая влажность. Измерения R и C выполнены прибором Актаком АМ-3001 на частоте 100 кГц. По известной емкости незаполненной песком ячейки и ее паразитной емкости были определены ϵ' , ϵ'' , и $\text{tg } \delta$ в зависимости от весовой влажности образца.

При микроволновых измерениях (рис. 1б) регистрировалась мощность радиотеплового излучения со средней частотой 13.5 ГГц и полосой 1 ГГц. Яркость температура на входе радиометра определяется суммой отраженного и собственного излучения исследуемой среды

$$T_x = T_B r + T_0(1 - r), \quad (2)$$

где r – коэффициент отражения по мощности от металлической кюветы с песком; T_0 – температура исследуемой среды; T_B – температура излучения нагреваемого эталона черного тела. В эксперименте в процессе нагревания и высушивания образца T_0 плавно возрастала до значения около 90°C за время 2–3 ч. При плавном изменении W происходит монотонное изменение r . Если в некотором узком интервале влажности, соответствующем критическому значению W_0 , полученному из низкочастотных измерений, будут наблюдаться выбросы T_x , то это будет означать влияние перколяции на микроволновые свойства увлажненной дисперсной среды. Дополнительным подтверждением прохождения через точку перколяции должно служить резкое изменение проводимости среды на постоянном токе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2 приведены результаты измерений диэлектрических параметров мелкого песка с размером частиц 0.2–0.4 мм при начальной весовой влаж-

ности 9.5%. Высушивание образца длилось 2.5 ч. Повышенное значение ϵ' соответствует большому увлажнению, при котором проявлялось влияние электродов ячейки. Электродный эффект наблюдается на низких частотах для увлажненной среды в ячейке и связан с влиянием двойных электрических слоев на границах среда – электрод, что приводит к некоторому кажущемуся возрастанию ϵ' (Бордонский и др., 2006). В этой области влажности (5–9.5%) значение $\text{tg}\delta$ изменялось от 3 до 3.7. Выброс на графике ϵ' вблизи $W \sim 4.5\%$ соответствовал значению $\text{tg}\delta$ около 1. Для влажности менее 3.8% $\text{tg}\delta \sim 0.1$. Таким образом, значение 4.5% равняется W_0 – критической влажности, соответствующей точке перколяции (Емец, 2002).

Результаты микроволновых измерений сигнала на горизонтальной поляризации в зависимости от влажности песка приведены на рис. 3. Использовали песок с теми же размерами частиц, что и при низкочастотных измерениях. Толщина слоя песка в кювете составляла 2 см, его начальная влажность 14%. Изменение влажности в эксперименте оценивалось из измерений времени высушивания. Мощность радиотеплового излучения представлена в относительных единицах (в виде напряжения на выходе радиометра). Измерения проводимости на постоянном токе в трех точках образца показали ее выбросы в интервале значений влажности 3–5%. Это связано с неоднородностью увлажнения в различных точках образца. В результате наблюдали размытый перколяционный переход.

Для другого образца результаты измерений мощности излучения представлены в зависимости от электрического сопротивления датчика проводимости среды рис. 4. Резкое возрастание сопротивления соответствовало существенному изменению угла наклона графика выходного напряжения радиометра от этой величины. Интересно отметить, что значение сопротивления датчика после резкого скачка в сторону увеличения несколько уменьшалось и затем возрастало при слабом росте радиояркой температуры.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Свойства увлажненных сред

Выполненное экспериментальное исследование изменения диэлектрических свойств увлажненного песка при уменьшении влажности показало, что при некотором значении W_0 , порядка единиц процентов для исследуемого песка, имеет место перколяционный переход на низких частотах, регистрируемый как резкое изменение электрических свойств среды. В коротковолновой части см-диапазона при тех же условиях обнаруживается достаточно выраженное немонотонное изменение микроволновых характеристик среды. Область таких изменений совпадает

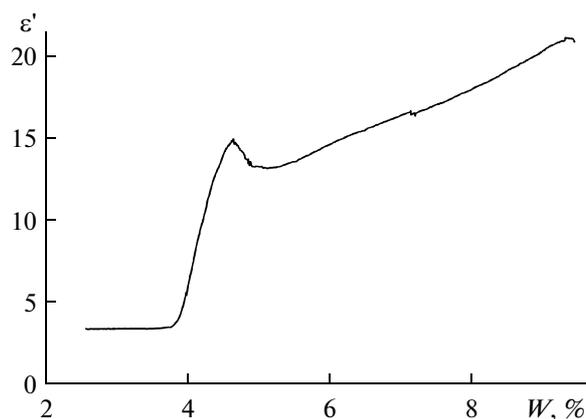


Рис. 2. Зависимость измеренной в емкостной ячейке действительной части диэлектрической проницаемости увлажненного песка на частоте 100 кГц от весовой влажности, полученная в процессе высушивания образца.

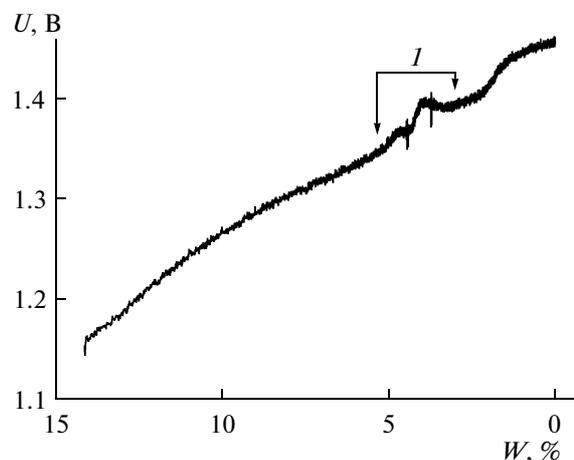


Рис. 3. Зависимость мощности радиотеплового излучения (в единицах выходного напряжения радиометра) увлажненного песка в двухсантиметровом диапазоне от весовой влажности при высушивании: I – интервал влажности, на котором отмечены скачкообразные изменения сопротивления трех, распределенных по образцу, датчиков проводимости. Измерения на горизонтальной поляризации.

на записях по времени со скачкообразным возрастанием сопротивления образца, т.е. с исчезновением сквозной проводимости на постоянном токе.

При эксперименте имел место разброс значений увлажнения в различных областях исследуемого образца. В случае однородного распределения влажности можно было бы ожидать более резкого изменения микроволновых свойств среды вблизи критической точки. Однако и без этого, как видно из рис. 4, прослеживается резкий переход между значениями влажности, разделенными W_0 .

Кроме чисто электродинамического описания процесса изменения ϵ' от влажности, следует обра-

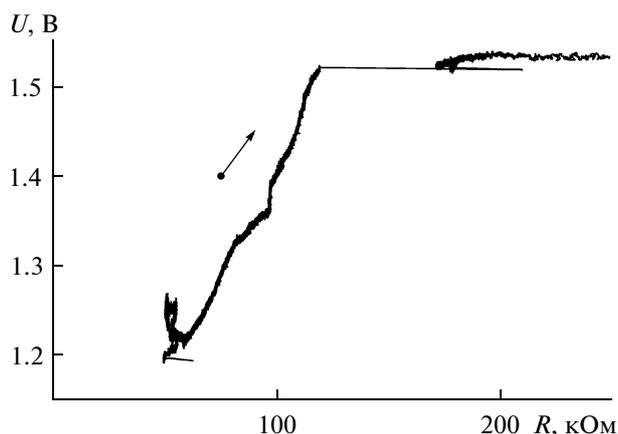


Рис. 4. Зависимость мощности радиотеплового излучения (в единицах выходного напряжения радиометра) увлажненного песка в двухсантиметровом диапазоне от сопротивления одного из датчиков проводимости среды при высушивании. Поляризация — горизонтальная. Стрелкой отмечено направление изменения величин от времени.

тратить внимание на химические особенности воды в поровом пространстве. Известно, что в работе (Дерягин и др., 1989) были обнаружены аномалии свойств воды в капиллярах малых диаметров, порядка десятков нанометров. При размерах около 1 мкм аномалии не наблюдались. Позднее было выяснено, что аномалии были связаны с растворением силикатов в воде, т.е. растворением стенок капилляров. Как оказалось, растворы имели существенно отличающиеся физические параметры для случая наноструктур. Поэтому при изучении электрофизических свойств воды в поровом пространстве необходимо учитывать ее растворяющую способность.

Эффекты, определяемые перколяцией, при ДЗ

Представляет интерес вопрос о видах природных объектов, где необходим учет перколяционных явлений при ДЗ. Насколько нам известно, этот вопрос для природных сред практически не исследован. Однако имеется много работ, где теоретически или экспериментально изучались композитные среды, в том числе и вблизи точки перколяции (Виноградов и др., 2008; Лагарьков и др., 1987).

Рассмотрение результатов радарного зондирования показывает, что отмеченная особенность наблюдалась ранее при радиолокационных исследованиях ледников и мерзлых грунтов. Давно замечено существование слоистости, например, ледяного щита Антарктиды при наземных и самолетных радарных исследованиях (Богородский и др., 1983). Наиболее выраженные отраженные сигналы наблюдали от слоев вблизи нижней границы покрова, которые отождествляют с существованием подледных озер. Однако до настоящего времени некото-

рые результаты радиозондирования льда Антарктиды не удается полностью объяснить. Вблизи дна ледника имеется область с отсутствием рассеяния излучения (без дополнительного затухания по сравнению со льдом), названная “эхо свободной зоной” (EFZ — echo free zone) (Drewry et al., 1978). За прошедшие более 30 лет после ее обнаружения высказывался ряд соображений о природе данного слоя. Предполагали: изменение плотности льда, наличие слоев повышенной кислотности, изменение ориентации осей кристаллов.

Недавно немецкие исследователи выполнили работу по сравнению результатов самолетного радиолокационного эксперимента с использованием двух импульсных радаров на центральные частоты 150 МГц и длительностью импульсов 60 и 600 нс с результатами бурения до глубины 2.6 км (Drews et al., 2009). Слой EFZ начинался на глубине 2.1 км. Выяснилось, что ни одна из ранее предложенных гипотез не объясняет существование “эхо свободной зоны”. Высказано предположение о потере когерентности рассеянного сигнала из-за возросшей текучести среды. Как нам представляется, перколяционная гипотеза более полно объясняет появление EFZ. На некоторой глубине при приближении к теплым земным породам между кристаллами льда возникают прослойки пленочной воды, создающие эффект перколяции. При наличии прослоек жидкости прочность среды резко снижается, что приводит к ее гомогенизации, т.е. отсутствию неоднородностей для радиолокационного сигнала из-за выраженного течения льда. Эта гипотеза объясняет и некоторое возрастание эхо-сигнала от верхней границы слоя EFZ, так как в этой области имеется заметный скачок диэлектрической проницаемости.

Тонкие проводящие слои были также обнаружены при радиоимпедансном зондировании на частотах до 1 МГц внутри мерзлых земных покровов (Ефремов, 2005).

Другим проявлением особых электромагнитных свойств среды при переходе через точку перколяции является изменение фазы коэффициента отражения от границы плоского слоя. Этот эффект необходимо учитывать при обработке данных радарной интерферометрии. В частности, британские исследователи на основании данных радарной интерферометрии со спутника ERS-2 обсуждали на одном из сайтов обнаруженное скачкообразное изменение высоты покрова вблизи оз. Восток и высказали предположение о существовании подледных рек. Однако это предположение вызвало возражение, связанное с недостаточной изученностью свойств льда вблизи температуры фазового перехода лед—вода (Бордонский и др., 2007). Экспериментальное подтверждение существенного изменения фазы коэффициента отражения было получено нами в лабораторном эксперименте при нагревании

блока льда до температуры таяния (Бордонский и др., 2009). Измеренное изменение фазы коэффициента отражения в сантиметровом диапазоне заметно превосходит значение, полученное из оценочных расчетов при простом увлажнении слоев льда.

Таким образом, представляется, что имеется группа объектов, где перколяционные явления необходимо учитывать при интерпретации данных ДЗ как в СВЧ, так и в УКВ-диапазонах. К ним можно отнести объекты, состоящие из малоувлажненных дисперсных сред при влажности, близкой к порогу перколяции, а также криосферные образования, находящиеся в области существенных изменений температуры и содержащих различные концентрации загрязняющих веществ. К таким объектам можно отнести: 1 – ледники и ледяные покровы, 2 – многолетнемерзлые земные покровы, 3 – снежные покровы, снегопады и кристаллические облака при наличии в них слипшихся частиц. Кроме земных объектов, можно отметить ледяные покровы холодных спутников планет, например, Европы и Энцелада.

ВЫВОДЫ

1. Перколяционный эффект (т.е. возникновение или исчезновение сквозной проводимости) при определенном значении влажности мелкодисперсной среды наблюдается на зависимостях ϵ' не только на низких частотах, но и до частот см-диапазона.

2. Как известно, перколяционный переход, в общем виде, напоминает фазовый переход из-за существенного изменения электрофизических свойств среды. Однако свойства проводящего компонента при переходе через критическую точку могут не изменяться. Изменяются коллективные свойства среды.

3. Для более обоснованных выводов о свойствах воды в тонких пленках и капиллярах при малых значениях увлажнения среды требуется знание концентрации растворенных примесей в жидкости и их состава, которые определяются химией поверхности твердых частиц.

4. Таким образом, чисто качественно различие в наблюдаемых электрических свойствах поровой воды при различных концентрациях – выше и ниже W_0 (критической концентрации) можно объяснить переходом через точку перколяции, когда в системе исчезают дальние корреляции диполей в среде. Для разработки соответствующей электродинамической модели на СВЧ и получения количественных оценок требуется специальное исследование. Данный вывод не отменяет возможности изменения форм воды. Для решения вопроса, наряду с радиофизическими, необходимы и другие методы исследований, применяемые в физике конденсированных сред.

5. Перколяция в среде изучаемого объекта может проявиться при радиолокационном подповерхностном зондировании однородных покровов при плавном изменении их увлажнения по глубине. В картине отраженных сигналов должны наблюдаться внутренние слои с существенным изменением рассеивающих излучение свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беляева Т.А., Боборов П.П., Кондратьева О.В., Репин А.В. Диэлектрические свойства капиллярно-менисковой почвенной влаги // Исслед. Земли из космоса (в печати).
- Богородский В.В., Бенгли Ч., Гудмансен П. Радиогляциология. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 318 с.
- Бордонский Г.С., Гурулев А.А. Возможные ошибки при интерпретации данных радиозондирования ледяных покровов // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 4. С. 3–7.
- Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д. Причины изменения фазы коэффициента отражения от границы воздух-лед в микроволновом диапазоне // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. №3. С. 260–266.
- Бордонский Г.С., Орлов А.О., Филиппова Т.Г. Температурная зависимость электрических параметров мерзлого песка на низких частотах // РЭ. 2006. Т. 51. № 3. С. 1–6.
- Виноградов А.П., Дорофеенко А.В., Зухди С. К вопросу об эффективных параметрах метаматериалов // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178. № 5. С. 511–518.
- Дерягин Б.В., Овчаренко Ф.Д., Чураев Н.В. Вода в дисперсных системах. М.: Химия, 1989. 288 с.
- Емец Ю.П. Дисперсия диэлектрической проницаемости двухкомпонентных сред // ЖЭТФ. 2002. Т. 121. Вып. 6. С. 1339–1351.
- Ефремов В.Н. Результаты радиоимпедансного зондирования земных покровов в аспекте возможностей применения для мерзлотных исследований // Матер. 3-й Конф. геокриологов России. МГУ. 2005. Т. 3. С. 305–312.
- Лагарьков А.Н., Панина Л.В., Сарычев А.К. Эффективная магнитная проницаемость композитных материалов вблизи порога протекания // ЖЭТФ. 1987. Т. 93. Вып. 1. С. 215–221.
- Сологубова Т.А. Собственное радиоизлучение и диэлектрические свойства малоувлажненных почв на сверхвысоких частотах: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. 1987. 178 с.
- Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1970. 416 с.
- Brovchenko I., Geiger A., Oleinikova A. Water in nanopores. Coexistence curves from Gibbs ensemble Monte Carlo simulations // J. Chem. Phys. 2004. V. 120. № 4. P. 1958–1972.
- Chaplin M. 2010. www.lsbu.uk/water/chaplin.htm.
- Drewry D.J., Meldrum D.T. Antarctic airborne radio-echo sounding, 1977–78 // Polar Records. 1978. V. 19. P. 267–273.
- Drews R., Eisen O., Weikusat I., Lambrecht A. et al. Layer disturbances and the radio-echo free zone in ice sheets // Cryosphere. 2009. V. 3. P. 195–203.
- Jahnert S., Chaver V., Schaumann et al. Melting and freezing of water in cylindrical silica nanopores // Phys. Chem. Chem. Phys. 2008. V. 10. P. 6039–6051.
- Takaiwa D., Hatano I., Tanaka H. Phase diagram of water in carbon nanotubes // PNAS. 2008. V. 105. № 1. P. 39–43.

Percolation Effect of Change Moisture Dependence on Dielectric Permittivity of Dispersed Media

G. S. Bordonskiy, A. O. Orlov

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Chita

The moisture dependence of electric properties of wet sand at 100 kHz and 13.5 GHz were investigated. It was founded, that percolation threshold changing of dielectric properties is observed at low frequencies, as far as microwaves. The threshold value of humidity divided electric properties on two areas with different parameters, but not for water properties. One can explained the appearance of reflected radar signals from inside layers of arbitrary homogeneous earths covers by using percolation effect.

Keywords: percolation threshold, wet sand, dielectric permittivity, microwaves