

Вариации микроволновых потерь в ветках сосны при отрицательных температурах

Г. С. Бордонский, А. А. Гурулев, А. О. Орлов, С. В. Цыренжапов

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
Чита, 672002, Россия
E-mail: lgc255@mail.ru*

В работе приведены экспериментальные данные по измерению прохождения микроволнового излучения на частотах 5,2 и 34 ГГц через хвою и хвойные ветки сосны обыкновенной при отрицательных температурах. Измерения выполняли в натуральных условиях для посадки сосны 40-летнего возраста в зимнее время в условиях резко континентального климата, а также в лабораторном эксперименте. В исследуемых объектах измеряли поглощение излучения при изменениях их температуры от 0 до -50°C . В натуральных условиях обнаружен гистерезис электромагнитных потерь в хвойных ветках, при котором потери на участке роста температуры оказывались выше, чем на участке их охлаждения. Такое поведение потерь оказывается аномальным по сравнению с другими увлажнёнными мелкодисперсными средами при циклическом охлаждении – нагревании, например глиной. При среднем значении затухания 3 дБ вариации прохождения мощности в ветках достигали 1,0 дБ. В ходе лабораторных исследований, выполненных отдельно для хвои и древесины веток, было установлено, что аномалии гистерезиса потерь соответствуют древесине веток, а не хвое. Предполагается, что эта особенность связана с образованием в древесине сегнетоэлектрического льда θ , на границах которого с материалом тканей появляются слои с высокой проводимостью. Эти слои приводят к росту фактора потерь. Причём эффект наиболее выражен для клеточных структур с вытянутыми жидкими включениями. Данный эффект необходимо учитывать при дистанционном зондировании лесов в зимний период времени, его можно использовать для определения тепловой истории хвойных деревьев.

Ключевые слова: переохлаждённая вода, микроволновый диапазон, диэлектрические свойства, нанопористые среды, вторая критическая точка воды, сегнетоэлектрический лёд θ

Одобрена к печати: 04.09.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-120-129

Введение

При дистанционном зондировании лесных массивов необходимы углублённые знания электромагнитных свойств их компонентов, например хвойных веток и хвои, которые существенным образом экранирует подстилающую поверхность (Sharikov, 2003). При положительных температурах окружающего воздуха ветки, хвоя и стволы деревьев изучены достаточно хорошо. Например, установлено резкое сезонное изменение отражательной способности из-за изменения водного режима лесных массивов (Калинкевич и др., 2010; Кочеткова и др., 2013). Но при отрицательных температурах, особенно ниже -20°C , возникает вопрос об особенностях трансформации водных растворов в такой среде и изменении её диэлектрической проницаемости. Эта задача является актуальной для многих стран Северного полушария, которые в зимний период находятся в области температур, достигающих -50°C . Постановка задачи изучения микроволновых характеристик тканей деревьев при низких температурах определяется их пористой структурой. Известно, что до 75 % объёма пор составляют структуры с диаметром меньше 2 нм (Колосовская и др., 1986). Для таких пор температура замерзания воды достигает -80°C (Limmer, Chandler, 2012). При глубоком охлаждении вода и водные растворы, находящиеся в древесине и хвое, претерпевают разнообразные фазовые переходы, влияние которых на радиопрозрачность древесной растительности исследована недостаточно.

Авторы исследования (Gurulev et al., 2017), изучая диэлектрические потери в хвое сосны при отрицательных температурах, обнаружили гистерезис затухания электромагнитного излучения на частоте 5,2 ГГц при суточном её изменении в интервале от -5 до -40 °С. Однако в этой работе не был выполнен анализ причин полученного результата, в том числе в отдельных компонентах веток. Вместе с тем знание особенностей микроволнового поглощения в сосновых деревьях необходимо при дистанционном изучении как лесных массивов, так и почв, на которых они произрастают. Цель настоящей работы заключается в том, чтобы продолжить исследование гистерезиса потерь отдельно для хвои и древесины веток в лабораторных условиях, а также предложить физический механизм обнаруженного эффекта, используя новые и ранее полученные данные.

Методика экспериментов

Натурные измерения. В натуральных условиях были выполнены измерения поглощения микроволнового излучения при просвечивании группы сосновых деревьев, как это представлено на схеме *рис. 1*. В этой схеме генератор (G) создаёт электромагнитное излучение, распространяющееся через ветки насаждения сосны обыкновенной. На расстоянии 38 м от генератора располагали приёмник излучения (R). Расстояние от приборов до поверхности почвы составило 4 м. Излучение и приём осуществляли на линейной вертикальной поляризации. Траекторию луча выбирали таким образом, чтобы она не попадала на стволы деревьев, а проходила через сосновые ветки. Кроме того, выбирали область деревьев, обращённую на север, для устранения возможности нагревания веток солнечным излучением.

Эксперимент выполняли в условиях резко континентального климата в Забайкальском крае на посадке деревьев сосны обыкновенной возраста 40 лет в середине зимы, когда суточные колебания температуры воздуха могли достигать значения 20 °С и выше. Для получения большого массива данных измерения проводили непрерывно в течение длительного времени. Использовали частоту 5,2 ГГц.



Рис. 1. Схема эксперимента по микроволновому просвечиванию группы сосновых деревьев: G — генератор миллиметрового диапазона; R — приёмник

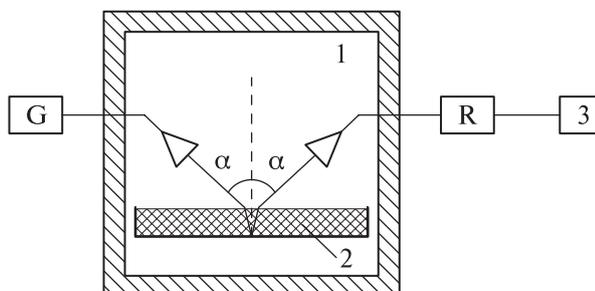


Рис. 2. Схема измерений потерь микроволнового излучения в образцах хвои и древесины веток в зависимости от температуры: 1 — климатическая камера ESPEC; 2 — металлическая кювета с образцом; 3 — система сбора информации; G — генератор миллиметрового диапазона; R — приёмник; α — угол падения излучения

Лабораторные измерения. При проведении лабораторных измерений ставилась задача исследовать гистерезис потерь пропускания излучения как хвои, так и древесины веток сосны, определить его особенности и физический механизм при медленном циклическом изменении температуры. Схема установки представлена на *рис. 2* (см. с. 121). Измерения были выполнены на частоте 34 ГГц. Охлаждение образцов, помещённых в металлическую кювету с плоским дном, осуществляли до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Предполагали, что затухание в основном определяется поглощением излучения в исследуемых материалах (т.е. рассеяние не учитывали, так как геометрические параметры поглощающей среды, составленной из хаотически расположенных элементов, не изменялись в процессе эксперимента, а само поглощение изменялось слабо при одной и той же температуре).

Данная методика измерения потерь аналогична использованной в работах (Бордонский и др., 2017; Mätzler, Wegmuller, 1987), в которых излучение генератора на вертикальной поляризации направляли на образец под углом α , равным углу Брюстера. В выполненном эксперименте измеряли мощность излучения, прошедшую через образец при его отражении от дна металлической кюветы, что позволило изучить динамику изменения потерь исследуемой среды при плавном изменении температуры.

Результаты измерений

В натуральных условиях были выполнены близкие к непрерывным измерения проходящей мощности излучения через ветки сосны с интервалом отсчёта 1 с в течение 14 сут (Gurulev et al., 2017). Исследовали посадку в виде полосы, состоящую из шести деревьев. Измерения были выполнены в дни, когда отсутствовали атмосферные осадки. При измерениях слой веток был выбран таким образом, чтобы среднее затухание, вызванное ветками с хвоей, было близким к 3 дБ. Измеренные значения весовой влажности хвои — $\sim 53\%$. Древесина веток имела близкие к хвое значения весовой влажности. За время измерений эти величины существенно не изменялись, так как влажность воздуха была низкой и осадки отсутствовали. Относительная масса хвои — $\sim 65\%$, древесины веток — $\sim 35\%$. Результаты измерений приведены на *рис. 3*. Основной результат этих измерений — наличие характерного гистерезиса потерь от температуры, причём повышенное их значение наблюдается на участке нагрева хвои.

На *рис. 4* представлен график изменения температуры воздуха вблизи поверхности ствола одного из деревьев на высоте 0,15 м от поверхности почвы.

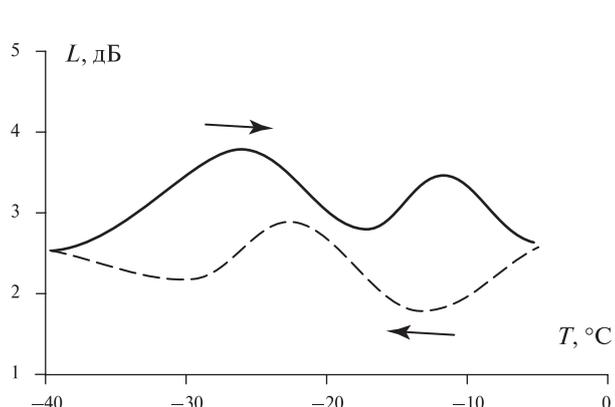


Рис. 3. Среднее значение измеренных потерь пропускания мощности излучения (L) хвои группы сосновых деревьев на частоте 5,2 ГГц при циклическом суточном изменении температуры воздуха за 14 сут непрерывных измерений. Стрелками отмечено направление изменения температуры воздуха

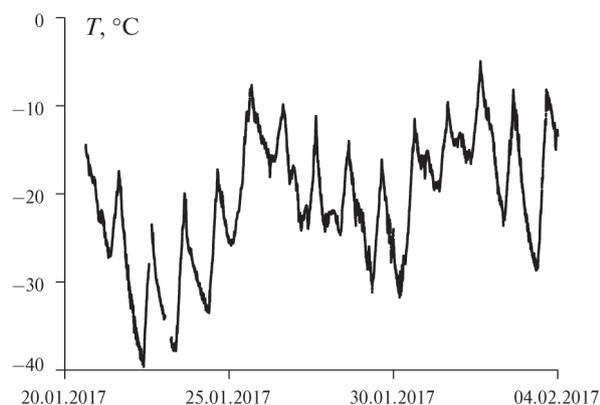


Рис. 4. Температура (T) воздуха вблизи поверхности ствола одного из деревьев за 14 сут эксперимента

В лабораторных измерениях использовали свежеприготовленные образцы хвои и древесины веток. Ветки (без хвои) перед их помещением в кювету измельчали на фрагменты длиной 2–5 см. Образцы собирали с деревьев при отрицательной температуре воздуха. При подготовке к измерениям исследуемый материал находился при положительных температурах около 30 мин.

Результаты измерений проходящей мощности в двух циклах охлаждения – нагревания хвои сосны (без древесины веток) от 25 до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ приведены на *рис. 5*. Время эксперимента составило 27 ч. Температуру изменяли во времени по линейному закону.

Как следует из эксперимента, имеет место гистерезис проходящей мощности со сдвигом двух графиков на 5–10 $^{\circ}\text{C}$. Если сравнивать графики изменения потерь в среде, то максимальные потери наблюдались на участке охлаждения хвои (проходящая мощность меньше), в отличие от графиков для натурального эксперимента для веток деревьев (см. *рис. 3*). Другая особенность результатов — некоторое уменьшение потерь после первого цикла изменений температуры.

Для другого аналогичного эксперимента выполняли четыре цикла охлаждения – нагревания от 20 до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 50 ч измерений с линейным изменением температуры образца во времени. Также наблюдали гистерезис пропускаемой мощности, аналогичный представленному на *рис. 5*, причём во втором, третьем и четвёртом циклах потери пропускания были одинаковыми в зависимости от значения температуры. Толщина насыпного слоя хвои — ~4 см. Весовая влажность хвои составляла 68 %.

Древесину веток сосны исследовали в экспериментах с различными законами изменения температуры. В первом случае температуру изменяли в интервале от положительных значений до отрицательных, во втором эксперименте — только в интервале отрицательных. При этом толщину образцов выбирали таким образом, чтобы в области нулевых температур наблюдался заметный уровень мощности прошедшего излучения. Такой выбор толщины слоя позволил сравнить значения потерь в широком интервале температур и определить особенности их изменения. Задавали четыре одинаковых цикла температуры во времени длительностью 12 ч каждый. Результаты измерений для первого и четвёртого циклов при изменении температуры в интервале от 15–20 $^{\circ}\text{C}$ до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ приведены на *рис. 6*. В этом эксперименте наблюдали существенное изменение характера зависимости проходящей мощности от числа циклов охлаждения – нагревания, причём потери пропускания были выше для участка нагревания образца в отличие от измерений для чистой хвои.

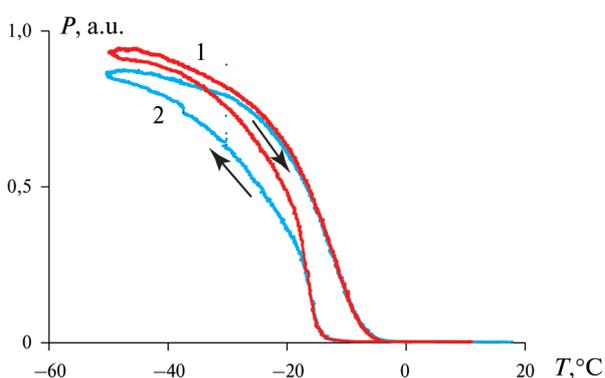


Рис. 5. Зависимость мощности проходящего через образец хвои излучения (P) сигнала от температуры при её циклическом изменении для образца из свежеприготовленной хвои сосны обыкновенной на частоте 34 ГГц. Значения мощности — в относительных единицах. Стрелками отмечено направление изменения температуры во времени: 1 — первый цикл; 2 — второй цикл изменения температуры

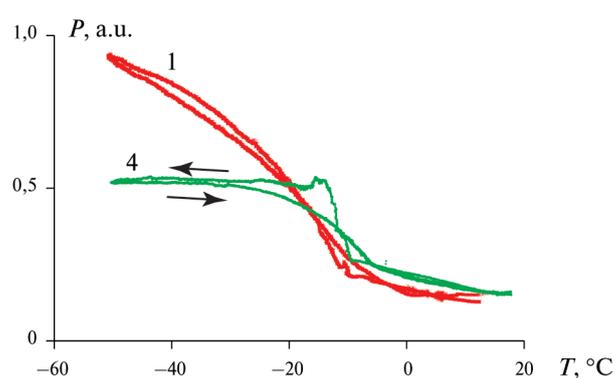


Рис. 6. Зависимость проходящей мощности микроволнового излучения на частоте 34 ГГц через образец из измельчённых веток сосны (без хвои) в зависимости от температуры: 1 — первый температурный цикл; 4 — четвёртый цикл охлаждения – нагревания образца. Стрелки возле кривых показывают направление процесса изменения температуры во времени. Регистрируемая мощность — в относительных единицах

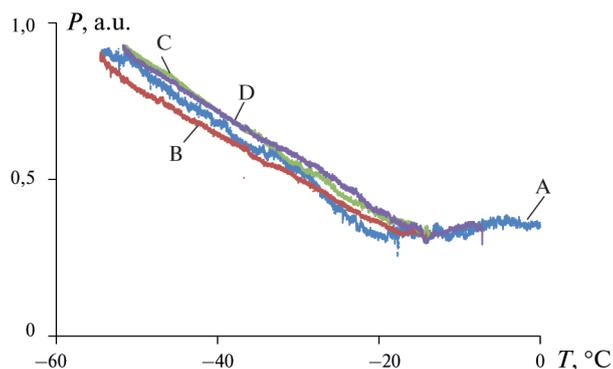


Рис. 7. Изменение мощности зондирующего сигнала, проходящего через древесину веток, в зависимости от температуры. Первый, второй циклы. А — начало эксперимента; В, С, D — временная последовательность для участков нагревания — охлаждения

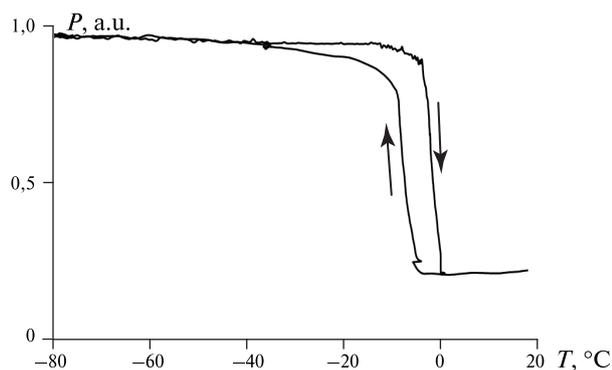


Рис. 8. Изменение мощности излучения на частоте 10 ГГц, проходящего через образец пеностекла со средними размерами пор 0,1 мм. Стрелками указано направление изменения температуры во времени

Если температуру в циклах изменяли в области отрицательных значений (с начальной точкой $+17\text{ }^{\circ}\text{C}$), то также наблюдали повышенные потери для участка нагревания древесины веток в первом цикле охлаждения — нагревания (рис. 7). Однако в отличие от результатов эксперимента (см. рис. 6) в данном опыте наблюдали практически полное совпадение проходящей мощности излучения в зависимости от температуры во втором, третьем и четвертом циклах её изменения.

Для целей сравнения были выполнены измерения потерь излучения в неорганических материалах — пеностекле и глине. На рис. 8 приведены графики изменения мощности сигнала микроволнового излучения, проходящего через образец пеностекла со средними размерами пор 0,1 мм и весовой влажностью 4 %.

Пеностекло имеет некоторое количество пор нанометрового размера, что следует из того, что процесс заморзания длится до температуры $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Наблюдаемый гистерезис потерь пропускания соответствует «нормальному» поведению, для которого потери в поровой воде образца меньше для участка нагревания. То же наблюдали для образца глины.

Обсуждение результатов

Выполненные температурные измерения относительного значения микроволновых потерь хвои и древесины веток сосны обыкновенной при циклическом изменении температуры в области её отрицательных значений выявили сложный характер этой зависимости. Обнаружен температурный гистерезис потерь как в случае наблюдений температуры в натуральных условиях для хвойных веток, так и при лабораторных измерениях для древесины веток без хвои. Такое поведение можно объяснить гистерезисом температуры фазового перехода воды в мелких капиллярах (Schreiber et al., 2001), а также структурными превращениями в растворах и их переохлаждением.

Однако в экспериментах обнаружилось anomальное поведение потерь пропускания для двух участков изменения температуры при охлаждении и нагревании. Оно заключается в том, что более высокие потери наблюдали при нагревании образцов после их охлаждения до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обычное поведение для большинства дисперсных сред — обратное, так как в поровом пространстве вода, имеющая более высокое значение фактора потерь, некоторое время не замораживает при понижении температуры. В обратном процессе в порах находится лёд, поэтому на стадии нагрева имеют место меньшие потери пропускания. Этот эффект наблюдается в большинстве мелкодисперсных сред, например в глинах, однако ранее его не принимали во внимание при решении задач дистанционного зондирования холодных слоистых покровов.

Возможное объяснение необычной зависимости микроволновых потерь от температуры для мёрзлых дисперсных сред предложено в работах (Бордонский, Орлов, 2017а; Бордонский и др., 2017). Оно связано с обнаружением новой кристаллической модификации льда — льда 0. Эта модификация образуется из переохлаждённой воды, являясь переходной формой ко льдам *Ih* или *Ic*. По оценкам, приведённым в работах (Quigley et al., 2014; Russo et al., 2014; Slater, Quigley, 2014), для небольших кластеров воды температура перехода составляет $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Экспериментальное подтверждение существования льда 0 получено в исследовании (Бордонский, Орлов, 2017б). Оно основано на том, что лёд 0 является сегнетоэлектриком. Как было показано в работах (Korobeunikov et al., 2002, 2005), если имеется контакт двух сред с высокой разностью статической диэлектрической проницаемости ϵ_s , то на нём возникает тонкий слой с высокой проводимостью. Проводимость этого слоя может оказаться в 10^5 раз больше, чем проводимость контактирующих сред. Если вода может быть переохлаждена ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ с последующим образованием льда 0, то дисперсная увлажнённая среда, имеющая высокую удельную поверхность порового пространства, существенно изменяет свои микроволновые характеристики (Бордонский, Орлов, 2017а, б; Бордонский и др., 2017). В случае циклического изменения температуры и при глубоком охлаждении среды в ней ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ начинает образовываться сегнетоэлектрический лёд 0. При обратном ходе температуры из-за накопления льда 0 и возрастания проводимости среды её фактор потерь (ϵ'') оказывается более высоким (так как $\epsilon'' \sim \sigma/\omega$, где σ — удельная проводимость, ω — циклическая частота).

Возрастание фактора потерь может наблюдаться в нанопористых средах с высокой удельной поверхностью пор (*S*) (Бордонский и др., 2017), что имеет место для тканей деревьев. Для этого случая в цитируемой работе при $S \sim 100\text{ м}^2$ выполнена оценка приращения $\Delta\epsilon''$ по формуле $\Delta\epsilon'' \approx (N\sigma_0)/(\epsilon_0\omega)$, где N — число, на которое возрастает проводимость воды в контактной плёнке с толщиной h ; σ_0 — доля проводимости среды, определяемая контактными плёнками с толщиной 0,1–1 нм без учёта эффекта её возрастания; ϵ_0 — электрическая постоянная; ω — частота поля. Оценка $\Delta\epsilon''$ на частоте 10 ГГц даёт ~ 10 , а на частоте 100 ГГц — ~ 1 . Следует отметить, что значение удельной поверхности пор клеточных стенок может достигать $400\text{ м}^2/\text{г}$ (Колосовская и др., 1986) для влажной древесины. При уменьшении влажности *S* падает и для сухой древесины составляет значения порядка единиц квадратных метров.

Вместе с тем эффект неоднозначности потерь не наблюдался для образцов из хвои (см. рис. 5). Однако материал веток, очищенных от хвои, показал аномальное поведение микроволнового поглощения при циклическом изменении температуры. Следовательно, причина этих отличий заключается в различиях строения тканей древесины и хвои или их химического состава, которые могли приводить к преимущественному образованию сегнетоэлектрического льда.

Вероятная причина разной температурной зависимости микроволнового поглощения материалов хвои и древесины веток связана с различием геометрии пространства, в котором расположены водные растворы. В работе (Бордонский, Орлов, 2017а) изучалось образование льда 0 и было установлено, что эта модификация более эффективно образуется в вытянутых наноразмерных порах, что было определено для специального материала SBA-15 (при диаметре пор $\sim 10,8\text{ нм}$ и их длине около десятков микрометров). Для увлажнённого SBA-15 был обнаружен характерный гистерезис низкочастотных электрических флуктуаций (шумов Баркгаузена), связанный с образованием сегнетоэлектрической фазы ниже $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$. При исследовании других нанопористых материалов с порами, форма которых близка к сферической, выраженного гистерезиса шумов Баркгаузена не наблюдалось. По-видимому, эта особенность проявилась при измерениях тканей сосны для микроволнового поглощения при сравнении двух материалов: древесина, особенно поры оболочек клеток, имеет выраженное волокнистое строение структур, содержащих воду, а хвоя не обладает такой структурой (Правдин, 1964).

В природной среде изменения температуры воздуха относительно медленные. Возникает эффект «закалки» клеток деревьев (Вода..., 1985), что приводит к их адаптации к воздействию низких температур. Это, по-видимому, проявилось в слабом изменении

значений микроволновых потерь для веток сосны в широком интервале температур при их циклическом изменении (см. рис. 2), в отличие от лабораторных измерений. Эксперименты показали, что даже в случае сильных суточных зимних вариаций температуры воздуха в течение двух недель наблюдений потери пропускания в хвойных ветках сосны имели близкие значения для различных температур и даже совпадали при -5 и -40 °С. Однако эти значения неоднозначно связаны с температурой для некоторых структурных элементов и определялись тепловой предысторией деревьев.

Совпадение потерь пропускания и, следовательно, ε'' при -5 и -40 °С (см. рис. 3) указывает на наличие в тканях сосны структурных компонент, обладающих особыми свойствами (растворов, кристаллогидратов, связанной воды при их взаимодействии со стенками пор). Затухание в слабо поглощающих средах можно представить приближённой формулой:

$$N = 8,68 \frac{\omega}{2c} \cdot \frac{\varepsilon''}{\sqrt{\varepsilon'}} h,$$

где N — затухание, вызванное поглощением в среде, в децибелах; c — скорость электромагнитных волн в вакууме; ε' — действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости среды; h — толщина поглощающего излучение слоя. Можно найти изменение N по результатам измерений ε'' в работе (Бордонский и др., 2017) для переохлаждённой объёмной воды и вычислить отношение $N(-5\text{ °С})/N(-40\text{ °С})$ на частоте 5,2 ГГц. Это отношение, согласно расчёту, приблизительно равно 2,5, а в выполненном натурном эксперименте оно составляет значение около единицы. Таким образом, можно предположить, что эффект «закалки» деревьев определяется трансформацией большей части воды, близкой по свойствам к объёмной воде, в связанное состояние при её миграции в поры с диаметром меньше 2 нм.

При плюсовых температурах, напротив, согласно (Калинкевич и др., 2010), обнаружены сильные изменения коэффициентов отражения от хвойного леса (и, следовательно, ε''), что связано с существенными вариациями концентрации воды, близкой по свойствам к объёмной, в ветках деревьев.

Выводы

При измерениях прохождения микроволнового излучения через хвойные ветки группы деревьев сосны обыкновенной возраста 40 лет в зимний период обнаружен гистерезис потерь мощности проходящего излучения при суточных изменениях температуры от -5 до -40 °С. При среднем значении потерь пропускания 3 дБ на частоте 5,2 ГГц наблюдалось их изменение в пределах ± 1 дБ.

Установлен аномальный характер гистерезиса потерь, при котором их значения оказались выше для участка нагревания веток сосны, чем для участка охлаждения при одинаковых температурах. Лабораторные исследования на частоте 34 ГГц при циклическом изменении температуры свежеприготовленных образцов показали, что этот эффект имеет место для материала древесины веток; для хвои эффект отсутствовал.

Аномальный характер гистерезиса потерь объясняется:

- а) различиями структуры ткани древесины и хвои, содержащей водные растворы: для древесины она имеет преимущественно вид тонких длинных цилиндров нанометровых диаметров, а для хвои эти структуры ближе к округлым формам;
- б) образованием в переохлаждённых водных растворах сегнетоэлектрического льда 0 (для чистой воды эта модификация может образовываться при температурах ниже -23 °С); такой лёд предпочтительнее образуется в длинных цилиндрических структурах из-за ослабления влияния электрических полей рассеяния на концах тонких цилиндров;
- в) возникновением дополнительных потерь из-за появления тонких слоёв высокой проводимости на границах сред с большой разницей статической диэлектрической проницаемости (т. е. льда 0 и тканей дерева).

На этапе охлаждения до температуры $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ лёд 0 отсутствует, возможно только образование обычного льда *II*. Лёд 0 появляется при дальнейшем охлаждении и обнаруживается в микроволновых параметрах в области нагревания сред из-за его накопления при низких температурах с последующим разрушением при температурах выше $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вблизи $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ экспериментально наблюдалась однозначность потерь пропускания излучения в ветках сосны в натуральных условиях.

Лабораторные и натурные относительные измерения показали, что поглощение микроволнового излучения хвоей и древесиной зависит от характера изменения температуры при её циклическом изменении (от скорости изменения, значений граничных температур и т. п.). Тепловая история среды играет важную роль в формировании электрической структуры среды из-за особенностей трансформации льда 0 в сложноорганизованной структуре. Эти особенности следует учитывать при обработке данных микроволнового зондирования поверхности, покрытой хвойными лесами, особенно в Арктике и Субарктике. Например, из-за неоднозначности микроволновых потерь радиояркость одного и того же объекта в зимний период может иметь различные значения при одинаковой термодинамической температуре приземной атмосферы.

Литература

1. Бордонский Г. С., Орлов А. О. (2017а) Поиски сегнетоэлектрических льдов в пористых средах в земных условиях // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 6. С. 45–54.
2. Бордонский Г. С., Орлов А. О. (2017б) Признаки возникновения льда «0» в увлажнённых нанопористых средах при электромагнитных измерениях // Письма в Журн. экспериментальной и теоретической физики. 2017. Т. 105. № 8. С. 483–488.
3. Бордонский Г. С., Орлов А. О., Хапин Ю. Б. Коэффициент затухания и диэлектрическая проницаемость переохлаждённой объёмной воды в интервале температур $0\text{...}-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ на частотах 11...140 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 255–270.
4. Вода и водные растворы при температурах ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ / ред. Ф. Франкс. Киев: Наукова думка, 1985. 387 с.
5. Калинин А. А., Крылова М. С., Арманд Н. А., Каковкина А. Ю., Слюсарев В. И., Манаков В. Ю., Плющев В. А., Lightart L. P. Исследование взаимосвязи отражательных свойств сосновых лесов и водного режима элементов деревьев // Российская научная конф. «Зондирование земных покровов радарными с синтезированной апертурой». Улан-Удэ, 6–10 сент. 2010. М.: ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2010. С. 1–14.
6. Колосовская Е. А., Лоскутов С. Р., Чудинов Б. С. Физические основы взаимодействия древесины с водой. Новосибирск: Наука. Сибирское отд-ние, 1986. 216 с.
7. Кочеткова Т. Д., Суляев В. И., Волчков С. И. Диэлектрическая проницаемость хвойных пород древесины в диапазоне частот 3–12 ГГц // Вестник Сибирского гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. 2013. № 5 (51). С. 101–104.
8. Правдин Л. Ф. Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М.: Наука, 1964. 192 с.
9. Gurulev A. A., Zheleznyak I. I., Tsyrenzhapov S. V. Microwave absorption ambiguity of pine needles at negative temperatures // Proc. SPIE: 23rd Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Irkutsk; Russian Federation. 2017. V. 10466. P. 104660I–1/4.
10. Korobeynikov S. M., Drozhzhin A. P., Furin G. G., Charalambakos V. P., Agoris D. P. Surface conductivity in liquid-solid interface due to image force // Proc. 2002 IEEE 14th Intern. Conf. Dielectric Liquids. 2002. P. 270–273.
11. Korobeynikov S. M., Melekhov A. V., Soloveitchik Yu. G., Royak M. E., Agoris D. P., Pyrgiotti E. Surface conductivity at the interface between ceramics and transformer oil // J. Physics D: Applied Physics. 2005. V. 38. No. 6. P. 915–921.
12. Limmer D. T., Chandler D. Phase diagram of supercooled water confined to hydrophilic nanopores // J. Chemical Physics. 2012. V. 137. P. 044509–1/11.
13. Mätzler C., Wegmuller U. Dielectric properties of freshwater ice at microwave frequencies // J. Physics D: Applied Physics. 1987. V. 20. No. 12. P. 1623–1630.

14. Quigley D., Alfè D., Slater B. Communication: On the stability of ice 0, ice i, and Ih // *J. Chemical Physics*. 2014. V. 141. No. 16. P. 161102–1/5.
15. Russo J., Romano F., Tanaka H. New metastable form of ice and its role in the homogeneous crystallization of water // *Nature Materials*. 2014. V. 13. No. 7. P. 733–739.
16. Schreiber A., Kotelsen I., Findenegg G. H. Melting and freezing of water in ordered mesoporous silica materials // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2001. V. 3. P. 1185–1195.
17. Sharkov E. A. *Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations*. Berlin, N. Y., L., P., Tokyo: Springer/PRAXIS, 2003. 613 p.
18. Slater B., Quigley D. Crystal nucleation: Zeroing in on ice // *Nature Materials*. 2014. V. 13. No. 7. P. 670–671.

Variation of microwave losses in pine branches at negative temperatures

G. S. Bordonskiy, A. A. Gurulev, A. O. Orlov, S. V. Tsyrenzhapov

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita 672002, Russia
E-mail: lgc255@mail.ru*

The paper presents experimental data on microwave radiation transmission at frequencies of 5.2 GHz and 34 GHz through needles and coniferous branches of *Pinus sylvestris* at negative temperatures. Measurements were carried out in natural conditions for planting 40-year-old pine in winter in a sharply continental climate, and also in a laboratory experiment. In the investigated objects, the absorption of radiation was measured when changes in their temperature from 0 to -50°C . In natural conditions, a hysteresis of electromagnetic losses in coniferous branches was detected, at which losses in the area of temperature growth were higher than in the region of their cooling. Such a behavior of the losses turns out to be anomalous in comparison with other moistened finely dispersed media at cycles of its cooling-heating, for example, clay. With an average attenuation value of 3 dB, the power transmission variations in the branches reached 1.0 dB. In laboratory studies performed separately for needles and wood branches, it was found that the anomalies of the loss hysteresis correspond to the wood of the branches, and not the needles. It is assumed that this feature is associated with the formation in the wood of ferroelectric ice 0, at its boundaries with other media the layers with high conductivity appear. These layers can lead to an increase in the loss factor. Moreover, the effect is most pronounced for cellular structures with threadlike liquid inclusions. This effect needs to be considered for remote sensing of forests in winter, it can be used for determining the thermal history of coniferous trees.

Keywords: supercooled water, microwave range, dielectric properties, nanoporous media, second critical point of water, ferroelectric ice 0

Accepted: 04.09.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-120-129

References

1. Bordonskii G. S., Orlov A. O., Poiski segnetoelektricheskikh l'dov v poristykh sredakh v zemnykh usloviyakh (The Search of Ferroelectric Ice in Porous Media in Earthly Conditions), *Kriosfera Zemli*, 2017, Vol. XXI, No. 6, pp. 45–54.
2. Bordonskii G. S., Orlov A. O., Priznaki vozniknoveniya l'da "0" v uvlazhnennykh nanoporistykh sredakh pri elektromagnitnykh izmereniyakh (Signatures of the Appearance of Ice 0 in Wetted Nanoporous Media at Electromagnetic Measurements), *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*, 2017, Vol. 105, No. 8, pp. 483–488.
3. Bordonskii G. S., Orlov A. O., Khapin Yu. B., Koeffitsient zatukhaniya i dielektricheskaya pronitsaemost' pereokhlazhdennoi ob'emnoi vody v intervale temperatur 0... -90°C na chastotakh 11...140 GGts

- (Attenuation Coefficient and Dielectric Permittivity of Supercooled Volume Water in the Temperature Range 0...–90 °C at Frequencies 11...140 GHz), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 255–270.
4. *Voda i vodnye rastvory pri temperaturakh nizhe 0°C* (Water and Aqueous Solutions at Temperatures Below 0°C), Kiev: Naukova dumka, 1985, 387 p.
 5. Kalinkevich A. A., Krylova M. S., Armand N. A., Kakovkina A. Yu., Slyusarev V. I., Manakov V. Yu., Plyushchev V. A., Lightart L. P., Issledovanie vzaimosvyazi otrazhatel'nykh svoystv sosnovykh lesov i vodnogo rezhima elementov derev'ev (Investigation of the Relationship Between the Reflective Properties of Pine Forests and the Water Regime of Tree Elements), *Rossiiskaya nauchnaya konferentsiya "Zondirovanie zemnykh pokrovov radarami s sintezirovannoi aperturoi"* (Russian Scientific Conf. "Sounding of Earth's Cover by Synthetic Aperture Radars"), Ulan-Ude, 06–10 Sept. 2010, Moscow: IRE im. V.A. Kotel'nikova RAN, 2010, pp. 1–14.
 6. Kolosovskaya E. A., Loskutov S. R., Chudinov B. S., *Fizicheskie osnovy vzaimodeystviya drevesiny s vodoi* (Physical basis of interaction of wood with water), Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otdelenie, 1986, 216 p.
 7. Kochetkova T. D., Suslyayev V. I., Volchkov S. I., Dielektricheskaya pronitsaemost' khvoinykh porod drevesiny v diapazone chastot 3–12 GGts (The Dielectric Constant of Coniferous Wood in the Frequency Range 3–12 GHz), *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M. F. Reshetneva*, 2013, No. 5 (51), pp. 101–104.
 8. Pravdin L. F., *Sosna obyknovennaya. Izmenchivost', vnutrividovaya sistematika i selektsiya* (Pine ordinary. Variability, intraspecies taxonomy and selection), Moscow: Nauka, 1964, 192 p.
 9. Gurulev A. A., Zheleznyak I. I., Tsyrenzhapov S. V., Microwave absorption ambiguity of pine needles at negative temperatures, *Proc. SPIE: 23rd Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics; Irkutsk; Russian Federation*, 2017, Vol. 10466, pp. 104660I–1/4.
 10. Korobeynikov S. M., Drozhzhin A. P., Furin G. G., Charalambakos V. P., Agoris D. P., Surface conductivity in liquid-solid interface due to image force, *Proc. 2002 IEEE 14th Intern. Conf. Dielectric Liquids*, 2002, pp. 270–273.
 11. Korobeynikov S. M., Melekhov A. V., Soloveitchik Yu. G., Royak M. E., Agoris D. P., Pyrgioti E., Surface conductivity at the interface between ceramics and transformer oil, *J. Physics D: Applied Physics*, 2005, Vol. 38, No. 6, pp. 915–921.
 12. Limmer D. T., Chandler D., Phase diagram of supercooled water confined to hydrophilic nanopores, *J. Chemical Physics*, 2012, Vol. 137, pp. 044509–1/11.
 13. Mätzler C., Wegmüller U., Dielectric properties of freshwater ice at microwave frequencies, *J. Physics D: Applied Physics*, 1987, Vol. 20, No. 12, pp. 1623–1630.
 14. Quigley D., Alfè D., Slater B., Communication: On the stability of ice 0, ice i, and Ih, *J. Chemical Physics*, 2014, Vol. 141, No. 16, pp. 161102–1/5.
 15. Russo J., Romano F., Tanaka H., New metastable form of ice and its role in the homogeneous crystallization of water, *Nature Materials*, 2014, Vol. 13, No. 7, pp. 733–739.
 16. Schreiber A., Kotelsen I., Findenegg G. H., Melting and freezing of water in ordered mesoporous silica materials, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2001, Vol. 3, pp. 1185–1195.
 17. Sharkov E. A., *Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations*, Berlin, New York, London, Paris, Tokyo: Springer/PRAXIS, 2003, 613 p.
 18. Slater B., Quigley D., Crystal nucleation: Zeroing in on ice, *Nature Materials*, 2014, Vol. 13, No. 7, pp. 670–671.