

УДК 537.226; 621.372

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ХВОЙНЫХ ПОРОД ДРЕВЕСИНЫ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 3–12 ГГц

Т. Д. Кочеткова, В. И. Суслеяев, С. И. Волчков

Томский государственный университет  
Россия, 634050, Томск, просп. им. Ленина, 36. E-mail: tdk\_tomsk@mail2000.ru

*Рассмотрены диэлектрические свойства древесины хвойных пород (ель, сосна, кедр, пихта). Измерения проводились в прямоугольных резонаторах в диапазоне 3–12 ГГц. Приведено сравнение с диэлектрической проницаемостью березы из разных мест произрастания, как представителя лиственных деревьев. Экспериментально исследовано влияние весовой влажности на диэлектрические свойства древесины. Результаты могут быть использованы для определения характеристик лесных массивов методами дистанционного зондирования.*

*Ключевые слова:* диэлектрическая проницаемость древесины, дистанционное зондирование лесных покровов.

## THE DIELECTRIC CONSTANT OF CONIFEROUS WOOD IN THE FREQUENCY RANGE 3–12 GHz

T. D. Kochetkova, V. I. Suslyayev, S. I. Volchkov

Tomsk State University  
36 Lenin prospect, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: tdk\_tomsk@mail2000.ru

*The dielectric properties of softwood (spruce, pine, cedar, fir) are observed. Measurements were performed in rectangular resonators in the 3–12 GHz. The comparison with the dielectric constant of birch of different backgrounds, as a representative of deciduous trees, is made. The effect of weight moisture on the dielectric properties of wood was researched. Results can be used for characterization of forest massifs by means of remote sensing techniques.*

*Keywords:* dielectric constant of wood, remote sensing of forest cover.

Мониторинг состояния лесов средствами дистанционного зондирования (ДЗ) в настоящее время остается актуальной задачей, как для российских исследователей, так и для мирового научного сообщества. Обзор международных программ, посвященных этой проблеме, проведен в работе [1]. Авторы отмечают, что вместе с достигнутыми успехами в вопросах выявления вырубок и координат пожарниц остаются нерешенными задачи лесоинвентаризационных работ, оценки с заданной точностью геометрических размеров вырубки, а также состояния сохранившегося древостоя. Перспективными в этом отношении являются новые системы гиперспектрального зондирования, которые открывают возможность диагностировать стрессовые состояния растительности из-за недостатка влаги или негативного техногенного влияния. В работе [2] по результатам самолетного эксперимента показано, что отражательная способность основного леса в  $L$  и  $P$  диапазонах согласуется с сезонным изменением водного режима хвои и тонких веток деревьев.

Основной характеристикой среды, исследуемой в микроволновом диапазоне, является диэлектрическая проницаемость. Даже самый быстрый обзор литературы показывает, что экспериментальное изучение диэлектрических свойств древесины не прекращается и по сей день, не смотря на многие десятиле-

тия истории таких измерений. Привлекаются разнообразные модели для описания диэлектрической проницаемости древесины в зависимости от влажности, температуры, частоты электромагнитного излучения: формулы теории композиционных смесей [3], рефракционная модель [4], аппроксимации экспериментальных данных [2; 5].

Методы измерения диэлектрической проницаемости влажных органических объектов, применяемые на практике, также разнообразны: по коэффициенту отражения зонда в виде открытого конца коаксиала [3], в коаксиальной линии [4], по КСВ дипольной антенны, расположенной в стволе дерева [5], методом нерегулярного микрополоскового резонатора [6–8], методом диэлектрической фурье-спектроскопии [9], в емкостной ячейке с плоскими электродами [10]. Авторы работы [11] предложили способ определения эффективной диэлектрической проницаемости лесного полога по прямым наземным измерениям ослабления поля.

Выяснены многие особенности в измерении диэлектрических свойств дерева. В работе [3] отмечается тензорный характер диэлектрической проницаемости древесины, обусловленный наличием четко выраженной анизотропии. В последние годы заметна тенденция исследовать именно «живое» дерево, так как выявлено количественное отличие влажностных зависимостей свежесрезанного образца древесины и под-

вергнутого предварительной сушке [4]. В работе [10] подробно исследована погрешность измерения диэлектрической проницаемости дисперсных сред на примере песка и древесины сосны на низких частотах в процессе замерзания.

Целью данной работы была попытка применить резонансную методику измерений для получения спектров диэлектрической проницаемости древесины и получить влажностные зависимости для различных хвойных пород.

**Объект и метод исследования.** Для изготовления образцов были взяты средние части стволов дерева. Древесина не подвергалась термообработке, но была выдержана в естественных условиях в течение нескольких лет. Образцы представляли собой тонкие стержни сечением  $2 \times 2$  мм, древесные волокна располагались вдоль длины стержней.

Для каждой породы дерева (береза, ель, кедр, пихта, сосна) было исследовано по 5 образцов. Для увлажнения использовалась дистиллированная вода. Увлажненные образцы выдерживались в герметичных контейнерах 1–2 сут для равномерного распределения влаги. Перед началом измерения определялись размеры сечения образцов с помощью штангенциркуля (погрешность  $\pm 0,01$  мм) и масса на весах Shimadzu AUX – 320 (погрешность  $\pm 0,0005$  г). После измерения образцы увлажнялись в большей степени. При достижении увлажнения порядка 60 %, образцы высушивались в сушильном шкафу при температуре  $75^\circ\text{C}$  до постоянства массы. Влажность в этом состоянии была принята за нулевую, а остальные значения влажности были рассчитаны относительно нее в весовых долях как  $W = (m_{\text{вл.обр}} - m_{\text{сух.обр}}) / m_{\text{сух.обр}}$ , где  $m_{\text{вл.обр}}$  и  $m_{\text{сух.обр}}$  – массы влажного и сухого образцов, соответственно.

Измерения диэлектрической проницаемости проводились стандартным резонаторным методом. В качестве измерительной ячейки использовались прямоугольные многомодовые резонаторы трех размеров  $58 \times 25 \times 480$  мм<sup>3</sup>,  $35 \times 15 \times 450$  мм<sup>3</sup> и  $23 \times 10 \times 250$  мм<sup>3</sup>, охватывающие диапазон 3–12 ГГц. Резонатор через емкостную диафрагму подключался к сверхвысоко-частотному тракту векторного анализатора цепей Agilent Technologies E8363B. Другой конец резонатора был закорочен. Образец древесины размещался

в отверстие в середине длины и широкой стенки резонатора, волокна древесины были параллельны линиям электрического поля.

Измерения проводились при комнатной температуре  $21 \pm 2^\circ\text{C}$ .

**Результаты измерений.** Частотные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости древесины пяти пород для двух значений весовой влажности представлены на рис. 1. Видно, что значения для хвойных пород сравнительно близки друг к другу, в отличие от значений для березы. Это может быть связано с различием химического состава и структуры древесины лиственных и хвойных деревьев. Такой результат согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работе [7].

Зависимость действительной части диэлектрической проницаемости от весовой влажности для двух экземпляров березы, отличающихся местом произрастания приведена на рис. 2, а. «Береза верховая» – так названо дерево, выросшее на пригорке, на легких суглинистых почвах, ее древесина светлая. «Береза низовая» выросла в низкой болотистой местности, внешне ее древесина имеет темный коричневый оттенок. Это объясняется тем, что в почве низко расположенных мест присутствует множество минеральных солей и органических соединений, которые проникают в древесину, придавая ей характерно темный цвет. Эти различия в происхождении деревьев одного вида оказываются заметны и по значению диэлектрической проницаемости. Результат исследования показывает, что минеральный состав поглощаемой деревом влаги играет большую роль, нежели структура древесины.

Влажностная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости для пяти пород древесины показана на рис 2, б. Хотя в рамках этой работы строгая аппроксимация с целью выделить пороги перехода воды в древесине в разные состояния не проводилась, можно видеть, что скорость нарастания значений диэлектрической проницаемости неодинакова и возрастает по мере увеличения влажности. Причем для лиственной породы – березы – эта зависимость также отличается от группы хвойных пород. Четко отделить хвойные породы между собой на данном этапе не удастся.

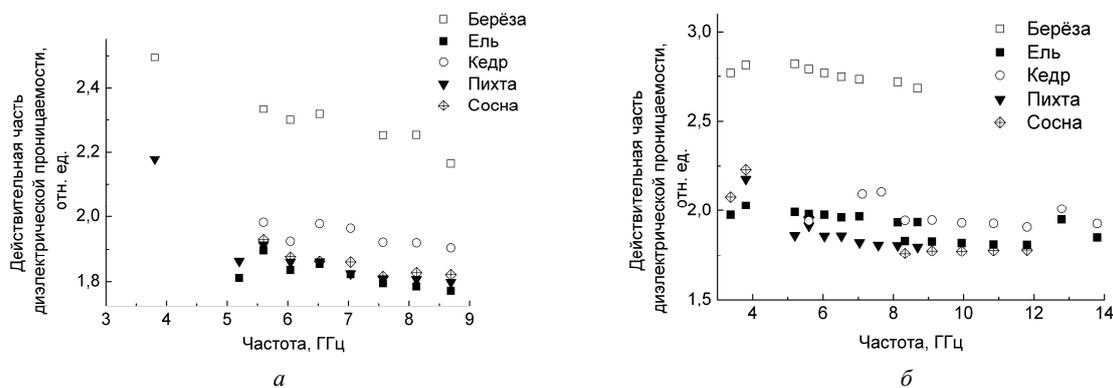


Рис. 1. Весовая влажность 0,01 (а); весовая влажность 0,03 (б). Температура  $21^\circ\text{C}$

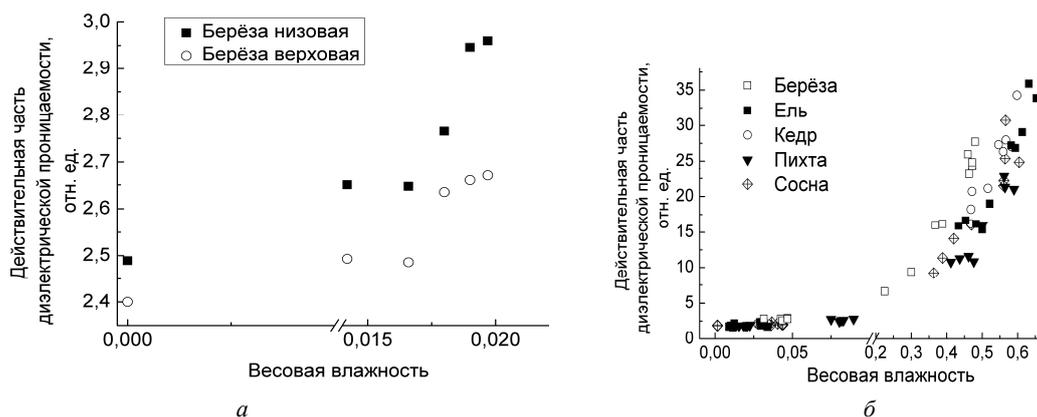


Рис. 2. Частота 3,807 ГГц (а); частота 5,2 ГГц (б). Температура 22 °С

Резонаторный метод измерения диэлектрической проницаемости древесины позволяет получить достоверные результаты, согласующиеся с данными других авторов. Показано существенное различие в диэлектрической проницаемости в зависимости от места произрастания дерева. На частотных и влажностных зависимостях четко видно отличие лиственных и хвойных пород деревьев. Минеральный состав поглощаемой деревом влаги играет большую роль, нежели структура древесины.

#### Библиографические ссылки

1. Козодеров В. В., Дмитриев Е. В. Аэрокосмическое зондирование почвенно-растительного покрова: модели, алгоритмическое и программное обеспечение, наземная валидация // Исследование Земли из космоса. 2010. № 1. С. 69–86.
2. Исследование взаимосвязи отражательных свойств сосновых лесов и водного режима элементов деревьев / А. А. Калинин, М. С. Крылова, Н. А. Арманд и др. // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 11. С. 1327–1334.
3. Комаров В. В. Тестирование моделей теории смесей применительно к расчету диэлектрической проницаемости влажной древесины в сверхвысоком частотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52, № 11. С. 1346–1352.
4. Романов А. Н. Влияние объемной влажности фазового состава воды на диэлектрические свойства древесины в микроволновом диапазоне // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 4. С. 461–466.
5. Об измерении диэлектрической проницаемости «живой» древесины дерева в целях микроволнового дистанционного зондирования / А. А. Калинин, Б. Г. Кутуза, М. С. Крылова и др. // Радиолокация и радиосвязь : доклады IV Всерос. науч.-техн. конф. 2010. С. 191–195.
6. Измерение влажности почв с использованием нерегулярного микрополоскового резонатора / Т. Д. Кочеткова, В. И. Суляев, В. А. Журавлев и др. // Ползуновский вестник. 2012. № 3/2. С. 170–174.
7. Мобильный прибор на основе нерегулярного микрополоскового резонатора для измерения влажности почв / Т. Д. Кочеткова, В. И. Суляев, Е. Ю. Коро-

вин, В. А. Журавлев // Доклады ТУСУРа. 2011. № 2 (24). Ч. 1. С. 249–252.

8. Исследование датчика на основе нерегулярного микрополоскового резонатора для измерения влажности почв / Т. Д. Кочеткова, В. А. Журавлев, В. И. Суляев и др. // Известия вузов. Физика. 2012. № 8/3. С. 112–117.

9. Степаниденко М. А., Ковалев А. В., Тарасова О. В. Оценка состояния лиственницы сибирской (*Larix Sibirica* Ledeb.) методом диэлектрической спектроскопии // Хвойные бореальной зоны. 2010. Т. XXVII, № 3–4. С. 275–278.

10. Бордонский Г. С., Орлов А. О., Филиппова Т. Г. Измерения низкочастотной диэлектрической проницаемости увлажненных дисперсных сред при отрицательных температурах // Криосфера Земли. 2008. Т. XII, № 1. С. 66–71.

11. Басанов Б. В., Ветлужский А. Ю., Калашников В. П. Метод определения эффективной диэлектрической проницаемости лесного полога // Журн. радиоэлектроники. 2010. № 4.

#### References

1. Kozoderov V. V., Dmitriev E. V. Issledovanie Zemli iz kosmosa, 2010, no. 1, pp. 69–86.
2. Kalinkevich A. A., Krylova M. S., Armand N. A., Kakovkina A. Y., Slyusarev V. I., Manakov V. Y., Plushchev V. A. Radiotekhnika i Elektronika, 2010, vol 55, no. 11, pp. 1327–1334.
3. Komarov V. V. Radiotekhnika i Elektronika, 2007, vol. 52, no. 11, pp. 1346–1352.
4. Romahov A. N. Radiotekhnika i Elektronika, 2006, vol. 51, no. 4, pp. 461–466.
5. Kalinkevich A. A., Kutuza B. G., Krylova M. S., Masyuk V. M., Khromets E. A., Kakovkina A. Y., Lightart L. P. Doklady IV Vserossiyskoy nauchno-technicheskoy konferencii “Radiolokacia i Padiosvyaz” (Proc. IV National Scientific and Technical Conference “Radar and radio communications”). Journal of Radioelectronics, IRE named. V. A. Kotelnikova PAH, Moscow, 2010, PDF, ISSN 1684-1719, pp. 191–195.
6. Kochetkova T. D., Suslyayev V. I., Zhuravlev V. A., Solovyova T. P., Korovin E. Y. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Fizika. 2012. № 8/3. pp. 112–117.

7. Kochetkova T. D., Suslyayev V. I., Zhuravlev V. A., Korovin E. Y., Solovyova T. P. Polzunovskiy vestnik, 2012.–№ 3/2. pp. 170–174.

8. Kochetkova T. D., Suslyayev V. I., Korovin E. Y., Zhuravlev V. A. Doclady TUSURa, 2011. №2 (24), Part 1. pp. 249–252.

9. Stepanidenko M. A., Kovalev A. V., Tarasova O. V. Khvoynye borealnoy zony, 2010, vol. XXVII, no. 3–4, pp. 275–278.

10. Bordonskii G. S., Orlov A. O., Filippova T. G. Kriosfera Zemli, 2008, vol. XII, no. 1, pp. 66–71.

11. Basanov B. V., Vetluzhckii A. Y., Kalashnikov V. P. Journal radioelektroniki, 2010.

© Кочеткова Т. Д., Суслыев В. И., Волчков С. И., 2013

УДК 504.064.3

## МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА\*

А. В. Дмитриев, В. В. Дмитриев, И. С. Коньшев, В. Н. Тудос

Омский государственный педагогический университет  
Россия, 644099, Омск, наб. Тухачевского, 14. E-mail: vdmitriev@omgpu.omsk.edu

*Описан аппаратно-программный комплекс, позволяющий с минимальными затратами определить пространственное распределение и статистические характеристики параметров микрорельефа подстилающей поверхности. Под микрорельефом в данном случае понимаются неровности размером от единиц миллиметров до единиц дециметров. Величина исследуемого участка поверхности определяется размерами лабораторного стенда и ограничена первым десятком квадратных метров. Определению поддаются горизонтальные и вертикальные размеры неоднородностей микрорельефа: среднее значение, дисперсия, распределение по размерам – его вид и количество мод. Также возможно построение ЦМР в исследуемом масштабе. Экспресс определение размеров производится в рамках модели двумерного случайного процесса, корреляционная функция которого вычисляется с использованием теоремы Винера–Хинчина. Для оценки распределения по размерам используется алгоритм размыкания контуров. Построение цифровой модели микрорельефа происходит с использованием стереофотографий.*

*Ключевые слова:* шероховатость почвы, дистанционное зондирование.

## METHODS OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PARAMETERS OF THE INEQUALITIES OF THE SOIL COVER

A. V. Dmitriev, V. V. Dmitriev, I. S. Konishev, V. N. Tudos

Omsk State Pedagogical University  
14 Tukhachevskiy st., Omsk, 644099, Russia. E-mail: vdmitriev@omgpu.omsk.edu

*The hardware-software complex which allows to define, with the minimum expenses, the spatial distribution and statistical characteristics of parameters of a micro relief of the spreading surface is described in the article. The micro relief in this case is understood as inequalities with the size from units of millimeters to units of decimeters. The size of a studied site of a surface is defined by the sizes of the laboratory stand and is limited to the first ten square meters. The horizontal and vertical extent of not uniformity of the micro relief can be defined: average value, dispersion, distribution by the sizes – its look and quantity of fashions. Creation of CMR in studied scale is also possible. The express determination of the sizes is made within model of the two-dimensional casual process which correlation function is calculated with the use of the theorem of Wiener–Hinchina. For the assessment of distribution by the sizes the algorithm of disconnection of contours is used. Creation of digital model of a micro relief proceeds with the use of stereo photos.*

*Keywords:* soil roughness, remote sensing.

подавляющее большинство задач дистанционного зондирования сводятся к взаимодействию волнового поля с исследуемым природным объектом. При теоретическом описании такого взаимодействия существенную роль играют характеристики поверхности, отграничивающей изучаемый природный покров

от воздушной среды. В особую группу таких характеристик обычно выделяют параметры, описывающие степень неровности (шероховатости) подстилающей поверхности.

В данной работе предпринята попытка создания алгоритмов для оценки величины неровностей (шеро-

\*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 12-05-98082-р\_сибирь\_а.