

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

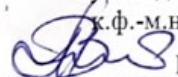
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Радиофизический факультет

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП

к.ф.-м.н., доцент



В.А. Мешеряков

« 01 » февраля 2021 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА СВЧ

по основной образовательной программе подготовки специалиста
по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Спиридонова Алексея Николаевича

Руководитель ВКР

кандидат физ.-мат. наук, доцент

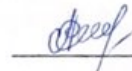


Т.Д. Кочеткова

« 01 » февраля 2021 г.

Автор работы

студент группы № 759



Спиридонов А.Н.

Томск-2021

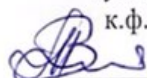
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ООП

к.ф.-м.н., доцент



В.А. Мещеряков

« 21 » сентября 2020 г.

ЗАДАНИЕ

на подготовку ВКР специалиста
студенту Спиридонову Алексею Николаевичу группы № 759

1. Тема ВКР: Исследование элементов растительности на СВЧ

2. Срок сдачи студентом выполненной ВКР:

- | | |
|---------------|-------------|
| а) на кафедре | 26.01.2021, |
| б) в ГЭК | 04.02.2021. |

3. Краткое содержание работы:

Целью данной работы является решение задачи измерения диэлектрических свойств природного объекта – дерева в зависимости от частоты электромагнитного излучения и влажности растительных элементов – листьев и веток, ствола.

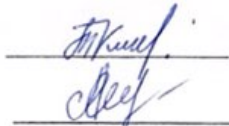
Предполагается провести ряд сезонных измерений диэлектрической проницаемости растительных элементов в ходе натурного и лабораторного эксперимента.

4. Календарный график выполнения ВКР:

- | | |
|--|-------------------------|
| а) изучение литературы | 22.12.2020 – 28.12.2020 |
| б) проведение измерений | 24.12.2020 – 28.12.2020 |
| в) обработка результатов измерений, анализ результатов | 24.12.2020 – 16.01.2021 |
| г) написание ВКР и сдача в ГЭК, | 12.01.2021 – 04.02.2021 |
| размещение текста ВКР в электронной библиотеке ТГУ | 24.01.2021 – 06.02.2021 |

5. Дата выдачи задания « 18 » сентября 2020 г.

Руководитель ВКР –
канд. физ.-мат. наук,
доцент кафедры радиоэлектроники



Кочеткова Т.Д.

Задание принял к исполнению



Спиридонов А.Н.

РЕФЕРАТ

Дипломная работа, 61 с., 35 рис., 39 источников.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ, КОАКСИАЛЬНО-ВОЛНОВОДНЫЙ МЕТОД, МЕТОД ОТКРЫТОГО КОНЦА КОАКСИАЛА, РЕЗОНАТОРНЫЙ МЕТОД ЛЕСНОЙ ПОЛОГ, ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ.

Объектом исследования являются образцы растительности, которые относятся к типу макрогетерогенных сред.

Цель работы – решение задачи измерения диэлектрических свойств природного объекта – дерева в зависимости от частоты электромагнитного излучения и влажности растительных элементов – листьев и веток, ствола.

В данной работе были использованы методы коаксиальной линии, открытого конца волновода, а также резонаторный метод для измерения диэлектрической проницаемости.

В процессе работы были проведены измерения КДП макрогетерогенных сред

В результате работы:

- а) проведен литературный обзор по методам исследования КДП, электрофизическим свойствам древесины и по применению результатов измерений КДП;
- б) проведены измерения;
- в) проведена обработка результатов измерений, а также анализ результатов;
- г) разработан стандарт организации.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Литературный обзор.....	7
1.1 Электрофизические свойства древесины.....	7
1.2 Методы измерений	8
1.3 Применение результатов измерения ДП древесины в дистанционном зондировании и неразрушающем контроле.....	11
1.4 Применение результатов измерения ДП древесины в моделировании диэлектрических свойств лесного полога.	15
1.5 Применение моделей леса в дистанционном зондировании и неразрушающем контроле	19
2 Экспериментальная часть.....	29
2.1 Коаксиально-волноводный метод.....	29
2.2 Резонаторный метод	32
2.3 Метод открытого конца коаксиала.....	36
3 Результаты измерений и обсуждения	38
3.1 Результаты измерения коаксиально-волноводным методом	38
3.2 Результаты измерения резонаторным методом	40
3.3 Результаты измерения методом открытого конца коаксиала	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	46
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	47
ПРИЛОЖЕНИЕ А	51

ВВЕДЕНИЕ

По данным федеральной службы государственной статистики [1] лесной фонд Российской Федерации от 25 сентября 2020 года занимает около 46% всей территории страны. Эта территория подвергается различным негативным воздействиям окружающей среды. К таким воздействиям относят: пожары самых разных масштабов, стирающих с лица Земли сотни гектаров леса; деятельность насекомых-вредителей, оказывающих губительное воздействие на ткани кустарников, деревьев, трав, что влечет за собой нарушение нормального развития растений, снижение их плодоношения, задержку роста, отмирание веток и крон, и соответственно гибель; а также массовые вырубki леса, влекущие за собой истощение лесного массива, исчезновение уникальной флоры и фауны, результатом чего является ухудшение экологической обстановки. Исходя из этого, становится явной необходимость постоянного наблюдения за лесным пологом, контроля и предупреждения катастрофических ситуаций в лесном массиве.

Одним из самых незаменимых инструментов масштабного изучения и наблюдения за лесной средой является дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ). В процессе зондирования происходит анализ диэлектрических характеристик различных элементов лесного массива, к которым относятся ветви, стволы деревьев, хвоя и листва. По мере изучения этих характеристик возникает два важных вопроса. Первый вопрос: изучение ослабляющих и рассеивающих свойств растительности. Второй вопрос: создание механизма учета влияния свойств растительности на характеристики сигнала.

С точки зрения электромагнетизма любые среды описываются всего двумя параметрами – электрической проводимостью σ и диэлектрической проницаемостью ϵ . Диэлектрическая проницаемость – это величина, показывающая, во сколько раз сила взаимодействия двух электрических зарядов в среде меньше, чем в вакууме. Данная величина представляет собой сумму действительной и мнимой части, первая из которых характеризует способность вещества поляризоваться под действием внешнего электрического поля, а вторая отображает поглощение энергии электромагнитного излучения.

Для измерения диэлектрической и магнитной проницаемости используются различные методы: в свободном пространстве, открытого конца коаксиала, волноводные, резонансные. Каждый метод имеет ряд достоинств и недостатков, поэтому метод измерения обычно выбирается из следующих соображений: доступного оборудования, условий измерения и свойств исследуемого объекта. В данной работе были использованы все перечисленные методы, кроме метода измерения в свободном пространстве.

Макрогетерогенными средами назовем вещество, состоящее из частиц размером более 10^{-5} м, но не более 2 мм или измельченное до таких размеров.

Целью данной работы является решение задачи измерения диэлектрических свойств природного объекта – дерева в зависимости от частоты электромагнитного излучения и влажности растительных элементов – листьев и веток, ствола.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- а) изучение литературы;
- б) проведение измерений;
- в) обработка результатов измерений, анализ результатов;
- г) разработка стандарта организации;
- д) написание ВКР и сдача в ГЭК, размещение текста ВКР в электронной библиотеке ТГУ.

1 Литературный обзор

1.1 Электрофизические свойства древесины

Диэлектрическая проницаемость. Величина, показывающая, во сколько раз увеличивается емкость конденсатора, если воздушную прослойку между пластинами заменить такой же толщины прокладкой из данного материала, называется диэлектрической проницаемостью этого материала. Данные для древесины показывают заметное различие между диэлектрической проницаемостью вдоль и поперек волокон; в то же время диэлектрическая проницаемость поперек волокон в радиальном и тангенциальном направлении различается мало. Диэлектрическая проницаемость в поле высокой частоты зависит от частоты и влажности древесины.

В поле высокой частоты древесина нагревается; причина нагрева – потери на тепло внутри диэлектрика, происходящие под влиянием переменного электромагнитного поля. На этот нагрев расходуется часть подводимой энергии, величина которой характеризуется тангенсом угла потерь.

Электропроводность. Электропроводность – способность древесины проводить электрический ток, которая находится в обратной зависимости от электрического сопротивления. Электрическое сопротивление зависит от влажности древесины, ее породы, температуры, направления волокон и пр.

Сухая древесина относится к диэлектрикам. Резкое снижение сопротивления наблюдается при увеличении содержания связанной воды. Дальнейшее увеличение влажности вызывает падение сопротивления лишь в десятки или в сотни раз.

Пьезоэлектрические свойства древесины. На поверхности некоторых диэлектриков под действием механических напряжений появляются электрические заряды. Это явление, связанное с поляризацией диэлектрика, носит название прямого пьезоэлектрического эффекта. Пьезоэлектрические свойства были вначале обнаружены у кристаллов кварца, турмалина, сегнетовой соли и др. Эти материалы обладают также обратным пьезоэлектрическим эффектом, заключающимся в том, что размеры их изменяются под действием электрического поля. Пластины из этих кристаллов находят широкое применение в качестве излучателей и приемников в ультразвуковой технике.

Эти явления обнаруживаются не только у монокристаллов, но и у целого ряда других анизотропных твердых материалов, названных пьезоэлектрическими текстурами. Пьезоэлектрические свойства были обнаружены также в древесине. Было установлено, что основной носитель пьезоэлектрических свойств в древесине – ее ориентированный компонент – целлюлоза. Интенсивность поляризации древесины пропорциональна величине механических напряжений от приложенных внешних усилий; коэффициент

пропорциональности называется пьезоэлектрическим модулем. Количественное изучение пьезоэлектрического эффекта, таким образом, сводится к определению значений пьезоэлектрических модулей. В связи с анизотропией механических и пьезоэлектрических свойств древесины указанные показатели зависят от направления механических усилий и вектора поляризации.

Наибольший пьезоэлектрический эффект наблюдается при сжимающей и растягивающей нагрузках под углом 45° к волокнам. Механические напряжения, направленные строго вдоль или поперек волокон, не вызывают в древесине пьезоэлектрического эффекта. Максимальный пьезоэлектрический эффект наблюдается в сухой древесине, с увеличением влажности он уменьшается, а затем и совсем исчезает.

Электрическая прочность. Электрическая прочность имеет значение при оценке древесины как электроизолирующего материала и характеризуется пробивным напряжением в вольтах на 1 см толщины материала. Электрическая прочность древесины невысока и зависит от породы, влажности, температуры и направления. С увеличением влажности и температуры она снижается; вдоль волокон она значительно ниже, чем поперек.

Влажность. Влажность древесины оказывает значительное влияние на ее свойства. Древесина содержит свободную (в полостях клеток) и связанную (в оболочках клеток) влагу. При высыхании древесина теряет сначала свободную влагу и только затем связанную.

Разница между массой влажного и сухого образца определяет количество воды, содержащееся в древесине.

1.2 Методы измерений

В настоящее время существуют различные методы измерения электрофизических характеристик, в основном, они отличаются способом измерений, объемом образца и диапазоном частот.

1) Метод измерения в линии передачи. Данный метод основан на использовании отрезка воздушной коаксиальной линии или отрезка прямоугольного волновода. Образец размещается внутри закрытой части линии передачи. Электрофизические характеристики, в частности, диэлектрическая проницаемость, вычисляются из результатов измерений модуля и фазы отраженного сигнала (S_{11}) или прошедшего сигнала (S_{21}). Данный метод является широкополосным, нижнее значение ограничено практической длиной образца, есть возможность измерения анизотропных материалов в волноводе. Применяются допущения свойств материала для измерений: однородность, гладкая и плоская поверхность, отсутствие воздушных зазоров на стенках устройства подключения, образец полностью заполняет устройства подключения.

2) Метод с применением конденсатора. В данном методе используются параллельные пластины, которые включают прослаивание тонкого листа материала между двумя электродами для формирования конденсатора. Обычно измерительная система, использующая метод параллельных пластин состоит из измерителя импеданса или анализатора импеданса и устройства подключения. Метод измерения электрофизических характеристик материала при помощи объемного резонатора это – высокодобротная структура, резонанс которой происходит на определенной частоте. При внесении образца изменяется центральная частота и добротность.

В работе [2] описаны методики и установка для измерения комплексной диэлектрической проницаемости составляющих растительности – листьев, древесины, веток и стволов в диапазоне 30-300 МГц. В установке используется высокодобротный LC-контур, в конденсатор, которого помещается исследуемый образец. Его КДП вычисляется на основании измеренных значений эффективной емкости и сопротивления диэлектрических потерь контура при наличии в нем образца. Блок схема состоит из измерителя АЧХ (индикаторный блок и генератор качающейся частоты), измерительного блока (элементы колебательного контура), детектора и усилителя.

3) Метод измерения в свободном пространстве. В этом методе используется антенна, задача которой фокусировка энергии СВЧ излучения в слой материала или сквозь слой, устройства подключения не обязательны. Метод является бесконтактным, его можно применять при исследовании материалов в условиях неблагоприятной окружающей среды, а также при высоких температурах нагревания исследуемого материала. Возможная измерительная система, использующая метод свободного пространства, состоит из векторного анализатора цепей, устройства подключения (антенны, тоннели, арки и т.д.), программного обеспечения и компьютера.

Одним из таких методов является метод, описанный в работе [3]. В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния видовых и структурных свойств лесной растительности на особенности распространения в ней электромагнитных волн. Разработана методика определения эффективной диэлектрической проницаемости лесной растительности на основе прямых измерений ослабления поля в лесном пологом, и получены ее значения для различных типов леса. Данный метод может использоваться только в полосе частот, на которых возможно формирование боковых волн, скользящих вдоль верхней кромки лесного покрова.

4) Метод открытого конца коаксиала. Этот метод позволяет измерить магнитную и диэлектрическую проницаемость в достаточно широком диапазоне частот. Использование данного метода на практике достаточно просто и удобно. Максимально точные значения

получаются для твердых материалов и жидкостей. В данном методе используются допущения: «полубесконечная» толщина образца, образец является немагнитным, образец изотропный и однородный, у него плоская поверхность и при соприкосновении с установкой нет воздушного зазора.

Разомкнутый коаксиальный пробник является срезом линии передачи. Свойства материала измеряются погружением пробника в жидкость или касанием пробником плоской поверхности твердого (порошкового, полутвердого) материала. Структура полей на конце пробника изменяется, как только коаксиальный пробник входит в контакт с исследуемым материалом. Отраженный сигнал (S_{11}) может быть измерен и связан с диэлектрической проницаемостью среды. Измерительная система, использующая метод коаксиального пробника, состоит из анализатора цепей или импеданса, коаксиального пробника и программного обеспечения. До начала измерений требуется калибровка на наконечнике разомкнутого коаксиального пробника. Калибровка уменьшает погрешность, так же для уменьшения погрешности измеряют три известных меры: воздух, короткозамыкающее устройство, дистиллированную воду. Разница ожидаемых и фактических значений применяется для устранения систематических (постоянных) ошибок при измерениях. Существуют три основные источника погрешности, при использовании данного метода: стабильность кабеля, воздушные зазоры, толщина образца.

В работе [4] представлен метод измерения диэлектрической проницаемости образцов древесины достаточно большой толщины (5-15 см), также описано программное обеспечение для извлечения диэлектрических параметров из измеренных величин. Этот конкретный экспериментальный метод основан на использовании излучения СВЧ диапазона и подходит для измерения при повышенных температурах и давлениях. Первые результаты для измерения древесины эвкалипта выявили сильную зависимость диэлектрической проницаемости от электрического поля в зависимости от направления волокон в образце, а также его влажности.

Процедуру для измерения диэлектрической проницаемости «живой» древесины предложил А.А. Калинкевич в работе [5]. Проницаемость ствола растущего дерева ϵ_1 была измерена с помощью вживленных в дерево полуволновых эллиптических вибраторов. Одновременно с измерениями, были взяты образцы древесины из того же дерева, и их проницаемости ϵ_0 определялись в лабораторных условиях. Сравнение полученных значений показало значительное разногласие между измеренными ϵ_1 и ϵ_0 . Исследование было проведено с целью смоделировать отражение микроволнового излучения от леса.

В работе [6] были исследованы электрические свойства термически модифицированной древесины южной сосны (*Pinus spp.*). В течение 4 часов образцы модифицировались при температурах 150 °С, 175 °С, 200 °С и 225 °С. После

кондиционирования образцов при пяти относительных влажностях измерялись и рассчитывались константы электрического сопротивления (kR) и диэлектрической проницаемости (kP).

5) Также для измерения диэлектрической и магнитной проницаемости применяется резонансный метод. Существуют различные виды резонаторов, такие как:

а) цилиндрический объемный резонатор, с диапазоном частот от 2 до 25 ГГц. Образец используется небольших размеров, цилиндрической формы. Резонатор обладает большой добротность, но имеет серьезный недостаток – образец в волноводе должен прилегать плотно к стенкам, при изготовлении таких образцов возникают трудности.

б) нерегулярный микрополосковый резонатор, обладает сравнительно небольшим диапазоном частот, от 500 МГц до 2 ГГц. Временные затраты на подготовку образца малых размеров достаточно большие, т.к. требуется плотное прилегание образца к центральному полюску и экрану.

в) прямоугольный многомодовый резонатор, он применяется для наблюдения резонансных кривых колебательного контура до введения образца и после. Образец при измерениях может быть различной формы. Основное требование к образцу, он должен быть меньше длины волны в резонаторе. По сравнению с использованием волновода и других линий передачи использование данного резонатора более точно, благодаря измерению сдвига частоты, а также надёжным и простым расчётам.

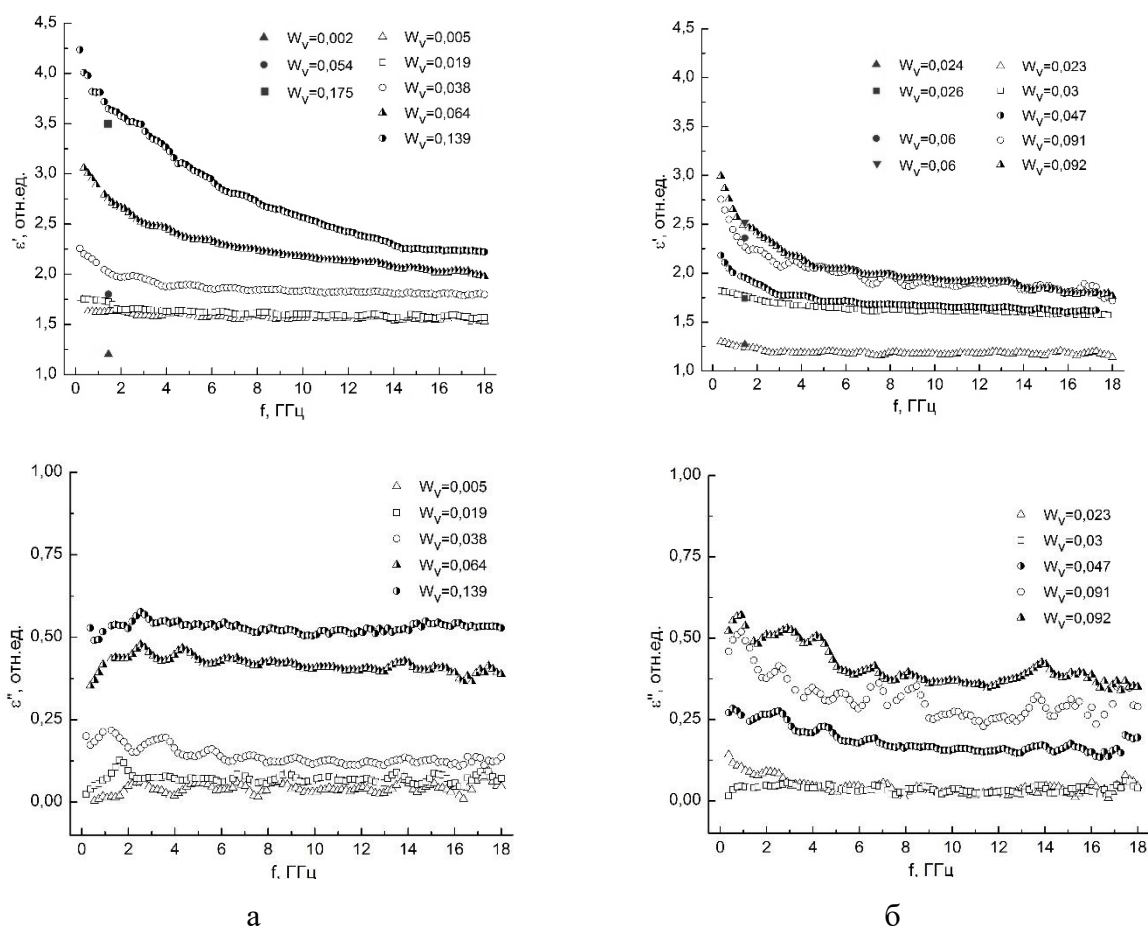
1.3 Применение результатов измерения ДП древесины в дистанционном зондировании и неразрушающем контроле

В работе [7] были рассмотрены системы СВЧ изображений для выполнения задачи неразрушающего контроля, способного извлечь информацию о внутренней структуре древесины. Для получения таких изображений используются аппараты, работа которых заключается в описании распределений диэлектрических свойств в древесине. В этой статье представлен прототип томографической микроволновой системы и сообщается ряд экспериментальных подтверждений его пригодности для использования в деревообрабатывающей и лесной промышленности.

Также в работе [8] авторы исследовали спектры диэлектрической проницаемости влажной древесины в терагерцовом диапазоне, которые позволяют пронаблюдать отчётливое проявление анизотропных свойств древесины и могут быть использованы при разработке систем неразрушающего контроля, а также при разработке моделей диэлектрической проницаемости лесных покровов в целях дистанционного зондирования Земли.

В работе [9] распространение GPR волны регулируются электромагнитными свойствами диэлектрического материала, такого как древесина, которая зависит от различных параметров, таких как влажность, а также неоднородностей внутреннего строения. Эта статья представляет некоторые лабораторные измерения для изучения зависимости электромагнитных свойств при распространении волны от содержания влаги и вариации направления волокон в образцах древесины. Диэлектрическая проницаемость была измерена с помощью резонансной методики на 1,26 ГГц (для образцов древесины ели и сосны) и по сравнению с измерениями с использованием георадара на 1,5 ГГц и дипольных антенн при различных значениях влажности. Результаты этого исследования показывают хорошие отношения между действительной и мнимой диэлектрической проницаемостями и влажностью образцов древесины. Подобное измерение так же было проведено авторами статьи [10]. Оценка влажности так же проводилась в работе [11], но в радиодиапазоне. Полученные зависимости указывают на сильное влияние анизотропии древесины, особенно на низких частотах.

Исходя из темы данной работы и опираясь на сведения работы [12], можно отметить, что в последнее десятилетие актуализировались проблемы деградации растительного покрова планеты, связанные с опустыниванием территорий, изменением видового состава растительных сообществ, исчезновением отдельных видов растительности. Наблюдаемые изменения вызваны как природными факторами (климатические изменения), так и постоянно увеличивающимся антропогенным прессом на окружающую среду. Автор данной работы привел результаты исследований диэлектрических характеристик болотной растительности на частотах от 100 МГц до 18 ГГц с использованием векторного анализатора цепей, а также исследований на частоте 1,41 ГГц мостовым методом с использованием измерителя разности фаз ФК2-18 при вариациях объемной влажности и температуры. В качестве объектов исследования использовались образцы, отобранные в Томской области и Ямало-Ненецком автономном округе: лишайник Клядония звездчатая (*Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar), мох Сфагнум (*Sphagnum*), представитель бриевых мхов – мох Дикранум многоножковый (*Dicranum polysetum*). Итогом данной работы стала зависимость комплексной диэлектрической проницаемости от частоты для мха и лишайника, изображенная на рисунке 1.



а

б

а – мох Сфагнум, б – лишайник Клядония звёздчатая

Сплошные символы – измерено на установке мостового типа, пустые символы – измерено на векторном анализаторе цепей.

Рисунок 1 – Зависимость действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости болотной растительности от частоты при разной влажности [12]

Из графиков было установлено, что диэлектрические и радиоизлучательные свойства болотной растительности: Клядонии звездчатой (*Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar), мха Сфагнума (*Sphagnum*), представителя бриевых мхов – мха Дикранума многоножкового (*Dicranum polysetum*) различаются во всем исследованном диапазоне частот. Наиболее заметные различия диэлектрических характеристик болотной растительности наблюдаются на частотах 100 МГц – 3.0 ГГц для влажной растительности. Колебательный характер частотных зависимостей мнимой части диэлектрической проницаемости обусловлен возникновением пространственных резонансов в измерительной ячейке. Установлено, что с увеличением объемной влажности численные значения диэлектрических параметров растительности возрастают по линейному закону.

Большое внимание привлекает статья [13], автором которой были изучены сезонные различия диэлектрических и радиоизлучательных характеристик карликовых пород древесной тундровой растительности в микроволновом диапазоне. Итогом работы стали зависимости

действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости на частоте 1.41 ГГц от температуры представленные на рисунке 2.

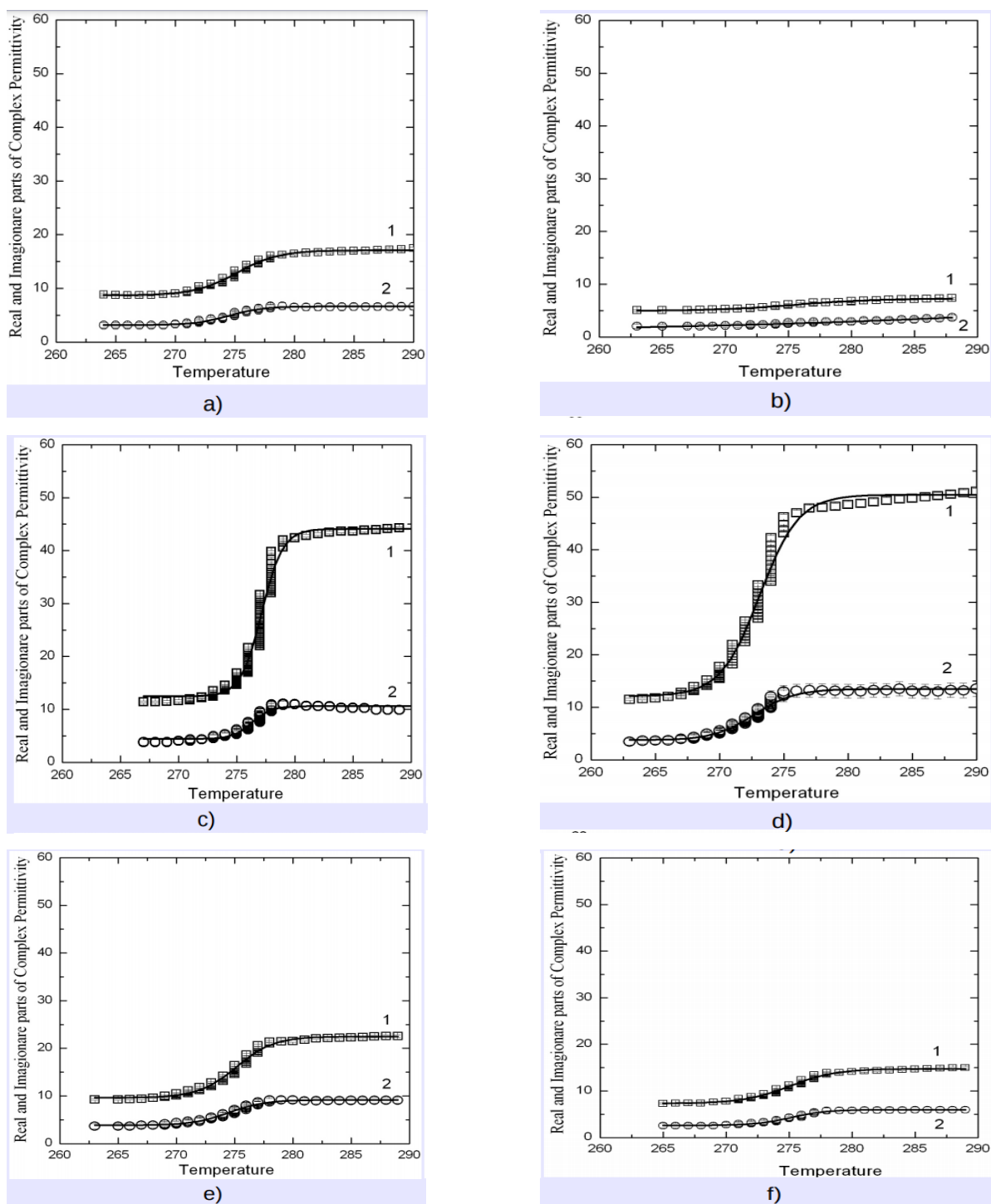


Рисунок 2 – Зависимости действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости на частоте 1.41 ГГц от температуры для образцов *Betulanana* (a, c, e) и *Salicaceae* (b, d, f), отображенных в апреле (a, b), августе (c, d), ноябре (e, f) [13]

Особенности поведения измеренных зависимостей для *Betulanana* и *Salicaceae* могут быть связаны с различным поведением внутри- и внеклеточной влаги в этих растениях при

вариациях температуры и влажности, соответственно с их разной реакцией на температурные изменения. В свою очередь, особенности поведения диэлектрических характеристик древесины при изменениях температуры и влажности обуславливают сезонные изменения радиоизлучательных характеристик лесной растительности, связанные с переходом температуры окружающей среды через 0°C .

Из графиков было установлено, что ветки характеризуются более высокими значениями ϵ' и ϵ'' по сравнению с листьями. Это может быть связано с большей объемной долей свободной воды в межклеточном пространстве веток, по сравнению с листьями

1.4 Применение результатов измерения ДП древесины в моделировании диэлектрических свойств лесного полога.

Дистанционное зондирование Земли – наблюдение поверхности Земли авиационными и космическими средствами, оснащёнными различными видами съёмочной аппаратуры. Рабочий диапазон длин волн, принимаемых съёмочной аппаратурой, составляет от долей микрометра (видимое оптическое излучение) до метров (радиоволны). Еще одним предназначением ДЗЗ является описание характеристик растительности, влияющих на распространение радиоволн внутри лесного полога. Для этого создают электродинамические модели леса.

В настоящее время существует несколько электродинамических моделей леса, которые отличаются друг от друга методами решения задач, представлением леса как среды и способ определения диэлектрических характеристик.

Электродинамические модели леса, анализируемые методом собственных функций.

При использовании данной модели для описания свойств растительности лес представляет собой бесконечную в горизонтальном направлении многослойную плоскостойкую среду (рисунок 3).

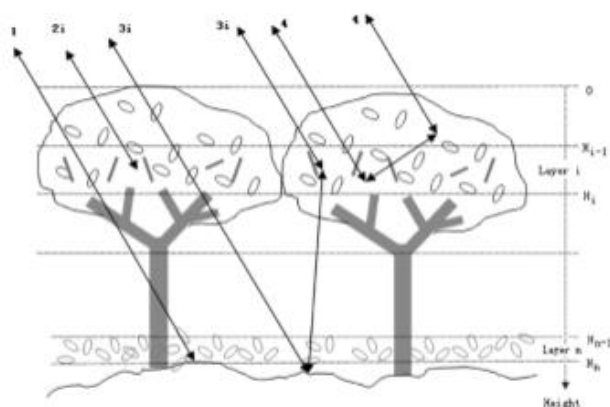


Рисунок 3 – Модель леса, анализируемая методом собственных функций [14]

Обычно для возбуждения этой среды используют антенны, которые могут быть расположены внутри лесного массива, а также над ним. Эти антенны представляют собой элементарные вертикальные, горизонтальные или наклонные вибраторы.

Из всего многообразия моделей леса, анализируемых этим методом, выделяют:

1. Трехслойная изотропная модель: однородное диэлектрическое полупространство с потерями, моделирующее Землю, плоский изотропный слой диэлектрика с потерями, моделирующий лес, однородное пространство над лесом.

2. Трехслойная анизотропная модель леса: лес рассматривается, как анизотропный диэлектрик с диагональным тензором ДП. Анизотропия ДП в данной модели вводится, чтобы описать влияние стволов деревьев, которые перпендикулярны поверхности Земли, поэтому такая модель учитывает различную реакцию леса на поля вертикальной и горизонтальной поляризаций.

3. Четырехслойная изотропная модель: в этой модели эффективная ДП верхней части леса определяется в основном листвой и ветвями, нижней части леса – стволами деревьев.

4. Четырехслойная анизотропная модель: в этой модели также вводится двухслойное описание леса: в верхней части леса доминируют листва и ветви, в нижней части леса – стволы деревьев, каждый из этих слоев описывается тензором ДП.

Для всех этих моделей решения электродинамических задач могут быть получены методом собственных функций (интегральных преобразований). Этот метод состоит в отыскании решений задач математической физики в виде рядов по собственным функциям операторов, входящих в исходную задачу.

Предположим, что рассматривается задача математической физики, записанная в виде линейного неоднородного уравнения.

$$Lu = F, \quad (1)$$

где L – линейный оператор с областью определения $D(L)$, F – заданная функция, u принадлежащая $D(L)$ – искомое решение. Рассмотрим задачу на собственные значения $Lu = \lambda u$ и предположим, что нам известны ортонормированные функции $\{u_n\}$ оператора L , соответствующие собственным значениям λ_n , $n=1, 2, \dots$, причем λ_n не обращаются в нуль. Пусть правая часть F уравнения (1) представима в виде ряда (конечного или бесконечного) по этим собственным функциям:

$$u = \sum_n c_n u_n. \quad (2)$$

Поскольку

$$Lu_n = \lambda_n u_n. \quad (3)$$

поэтому используя ортогональность $\{u_n\}$, приходим к соотношению:

$$c_n \lambda_n = F_n \quad (4)$$

Значит,

$$c_n = \frac{F_n}{\lambda_n} \quad (5)$$

и решение u имеет вид:

$$u = \sum_n \frac{F_n}{\lambda_n} u_n. \quad (6)$$

Если в бесконечном ряде ограничиться N первыми слагаемыми, то решение - функция вида

$$u^{(N)} = \sum_{n=1}^N \frac{F_n}{\lambda_n} u_n \quad (7)$$

По существу, указанные задачи являются обобщениями классической задачи Зоммерфельда на плоскостойкие среды.

Строгое решение указанных задач записывается в виде интегралов по спектру плоских или плоско цилиндрических волн. Строгое решение формально позволяет найти поле на любых расстояниях от источника, однако такой путь вычисления весьма трудоемок. Кроме того, результаты расчета полей по строгому решению трудно интерпретировать. Поэтому наибольшее распространение получил следующий подход: после получения строгого решения проводится его асимптотическое исследование. Из интегральных представлений поля выделяются с помощью асимптотических методов основные вклады в поле, имеющие четкий физический смысл. Методами перевала или стационарной фазы находится лучевое представление поля (приближение геометрической оптики (ГО)). Интегралы по разрезам дают боковые волны. Вычисление вкладов от полюсов интегральных представлений дает выражения для поверхностных, волноводных (в отсутствие потерь в среде) или, в общем случае, комплексных мод. Эти структуры полей формируются на больших расстояниях от источника и локализованы в определенных областях пространства, что позволяет построить приближенное решение задачи, учитывающее основные механизмы распространения поля из точки передачи в точку приема.

Электродинамические модели леса, анализируемые методом параболического уравнения. Метод параболического уравнения (МПУ) в применении к излучению

элементарного источника над землей был предложен М.А. Леонтовичем. Идея МПУ хорошо известна и обычно излагается в применении к скалярному двумерному уравнению Гельмгольца для функции $U(x, z)$, где x – горизонтальная, z – вертикальная прямоугольные координаты. U – комплексная амплитуда поля, временной множитель $\exp(i\omega t)$. Положим, что поле в направлении $x > 0$ может быть приближенно представлено плоской волной вида $U_0 = \exp(-ik_0 x)$. Уравнение Гельмгольца преобразуем подстановкой $U(x, z) = \exp(-ik_0 x)V(x, z)$. Наложив требование на вторую производную функции V по переменной x $|\partial^2 V / \partial x^2| \ll |\partial^2 V / \partial z^2| \approx 2k_0 |\partial V / \partial x|$ и пренебрегая в исходном уравнении для функции V второй производной V по x , получим параболическое уравнение

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} - 2ik_0 \frac{\partial V}{\partial x} + k_0^2 [\varepsilon(x, z) - 1]V = 0, \quad (8)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ – волновое число, λ_0 – длина волны в свободном пространстве, $\varepsilon(x, z)$ – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость среды.

При $\varepsilon = 1$ и плоской границе ПУ имеет аналитическое решение, при $\varepsilon = \varepsilon(x, z)$ и нерегулярной границе для его решения приходится привлекать численные методы.

Численная реализация МПУ применяется к РРВ над поверхностью с переменным профилем местности, а также в неоднородной тропосфере при условии $|\varepsilon(x, z) - 1| \ll 1$. Данное условие можно полагать справедливым и для описания леса его усредненными электрофизическими параметрами, ведь, опираясь на экспериментальные данные, действительная часть эффективной ДП леса близка к единице, а мнимая практически равна нулю.

Широкое применение МПУ на практике объясняется возможностью использования этого метода при переменной границе местности и диэлектрической проницаемости.

Статистические модели леса. В последние годы интенсивно развиваются статистические модели распространения радиоволн в лесу. Данные модели являются более адекватными на частотах свыше 200 МГц по сравнению с приближением эффективной диэлектрической проницаемости. Но их построение и вычислительная реализация намного сложнее, чем для моделей леса, описываемых регулярной эффективной диэлектрической проницаемостью, что требует связки статистических моделей с данными, полученными в результате эксперимента. Наиболее распространена идея, при которой стволы деревьев моделируются цилиндрами, бесконечно длинными либо конечной длины, ветви и хвоя – цилиндрами конечной длины, листья – плоскими круглыми дисками. Диэлектрическая проницаемость всех элементов полагается комплексной. Деревья считаются случайно расположенными, ветви и листья случайно ориентированными. Как правило, полагается, что плотность растительности невелика. Расчет характеристик поля проводится на основе теории

распространения волн в среде со случайными дискретными рассеивателями в приближении однократного или многократного рассеяния.

1.5 Применение моделей леса в дистанционном зондировании и неразрушающем контроле

В работе [15] представлен новый метод, использующий как алгоритм удвоения матрицы, так и решение уравнения радиационного переноса первого порядка (РП) для моделирования микроволнового обратного рассеяния из леса. Метод основан на предположении, что полог леса может быть разделен на несколько различных горизонтальных растительных слоев, расположенных сверху и снизу сквозной поверхности. Матрица рассеяния фазы каждого слоя рассчитывается либо путем удвоения матрицы, чтобы учесть эффект многократного рассеяния, либо решением уравнения РП первого порядка в зависимости от характеристик рассеяния слоя. Решение уравнения РП первого порядка используется для магистрального слоя, в то время как метод удвоения матрицы применяется как к кронному слою, так и к основанию. Усовершенствованная модель интегрального уравнения и матрица отражения используются для расчета когерентных поверхностных условий. По итогам работы было проведено сравнение измеренных и рассчитанных коэффициентов обратного рассеяния, которое приведено на рисунке 4.

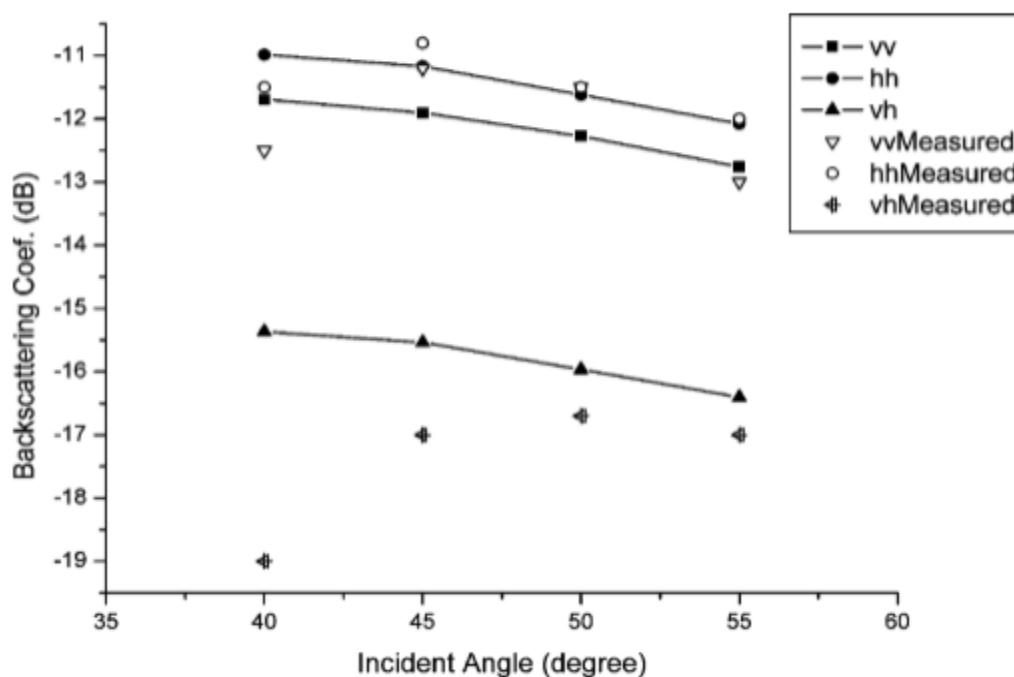


Рисунок 4 – Сравнение измеренных и рассчитанных коэффициентов обратного рассеяния

[15]

Также, например, в работах [16, 17] была принята трехслойная модель леса и некоторые ее модификации. В [16] лес аппроксимируется изотропным поглощающим слоем в диапазоне частот 1-100 МГц. Учитывается боковая волна, антенны располагаются внутри слоя. В [17] в трехслойной модели леса учитывается отражение от поверхности земли.

Интересными в этом плане также являются работы [18, 19] по 4-хслойной изотропной модели леса. В этих работах получено строгое интегральное представление поля в векторной форме для наклоненного диполя, создающего вертикальную и горизонтальную поляризации. Передатчик располагался на уровне стволов, приемник – на уровне стволов или в листе. Методом седловой точки изучено прямое и многолучевое распространение. Найдены боковые волны (БВ) и квазиповерхностные волны (КПВ) вдоль каждой из границ раздела. Проведено обсуждение сходимости выражений для выделенных структур полей. Найдено представление полей диполей в виде комплексных изображений по методу Прони (ближняя зона). Записано выражение для расчета потерь в лесу в виде суммы пяти слагаемых для каждой поляризации (геометрической оптики (ГО) поле, три БВ и КПВ, ближнее поле). Показано, что полное поле может быть представлено в виде прямой волны, многократно отраженных волн и трех БВ и КПВ, причем главную роль играет БВ, формирующаяся вдоль границы воздух - листва. Проведена серия расчетов: отдельно потери по ГО, отдельно боковые волны, суммарные потери. Четко виден переход от ГО потерь к потерям на БВ на расстоянии около 3 км. Расчеты проводились для частот 100, 500, 3000 МГц, расстояний 0,1-10 км. В отличие от отечественных данных приближение ГО действует на больших расстояниях, по-видимому, из-за потерь боковых волн в дожде.

Особенностью применения ПУ является использование модели леса как сплошной среды с заданной эффективной диэлектрической проницаемостью, что ограничивает применение ПУ частотами порядка 1 ГГц. В докладе [20] рассматривается распространение радиоволн с использованием метода параболического уравнения для двумерной и трехмерной пространственных моделей. МПУ в двумерном случае позволил проанализировать условия распространения радиоволн (РРВ) внутри лесного массива, а также оценить влияние формы полога леса на РРВ от антенны. В трехмерном случае реализован метод ПУ для расчета структуры электромагнитного поля ферритовой антенной решетки (ФАР) с большим числом элементов над поверхностью Земли при наличии сложных препятствий в зоне Френеля. По итогам исследования было определено, что метод позволяет провести расчет санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки вблизи мощных ФАР с учетом профиля местности и при наличии препятствий. Также было получено распределение поля в условиях сложного ландшафта с неровностями и лесом на частоте 900 МГц, которое изображено на рисунке 5.

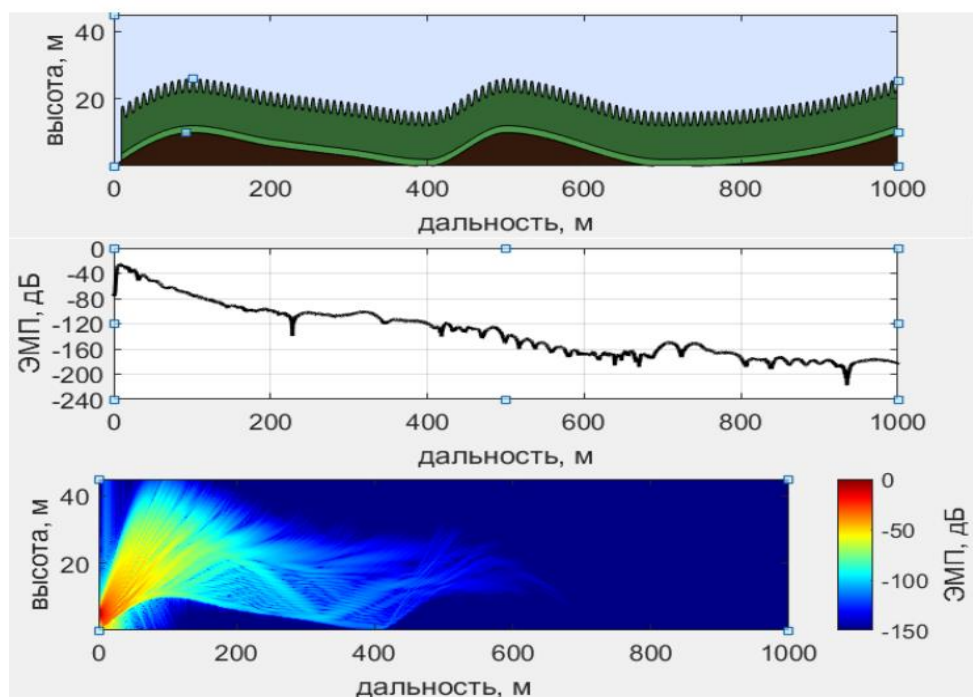


Рисунок 5 – Распределение поля в условиях сложного ландшафта с неровностями и лесом на частоте 900 МГц [20]

РРВ в лесу в приближении скалярного ПУ (двумерные модели среды) рассматривалось в ряде работ, из которых можно отметить [21 – 23]. Как следует из указанных работ, метод ПУ вполне приемлем для прогноза РРВ в лесу в условиях, когда передающая и приемная антенны находятся вне леса. Случай, когда одна или обе антенны радиолинии находятся в лесу, требует дополнительной методической проработки, хотя принципиальных трудностей ожидать не следует.

При описании процессов распространения радиоволн в лесу активно используют статистические модели леса [24 – 30]. Так, например, лесной полог, как статистическая модель был представлен в статье И.В. Мателенка [24], в которой были исследованы участки в подзоне южных тундр, покрытых преимущественно ерником. В итоге данного исследования были построены трёхмерные модели фрагментов ерникового покрова, которые могут быть использованы как для описания распространения излучения в многослойных природных средах, так и для анализа микроклимата. Данная модель представлена на рисунке 6.

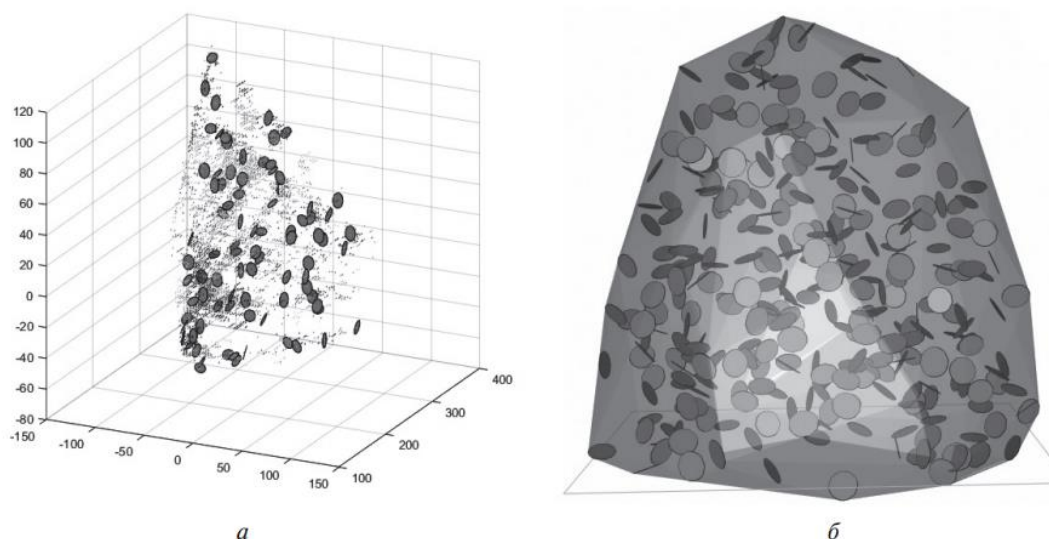


Рисунок 6 – Трехмерная графическая модель фрагмента ерникового покрова [24]

Особенно интересна работа [27], целью которой было построение электродинамической модели лесной среды; электродинамическое описание основных механизмов распространения УКВ в условиях леса в зависимости от расстояния между корреспондирующими пунктами, с учетом реальных параметров лесных массивов: размеров, плотности, диэлектрической проницаемости деревьев, а также влияния поверхности земли. По итогам этой работы было определено, что распространение УКВ в лесу между двумя низкорасположенными пунктами работает дуальный механизм распространения радиоволн. Ослабление УКВ лесным массивом можно описать на основе представления леса в виде случайно-неоднородной среды, состоящей из большого количества дискретных рассеивателей – деревьев, с помощью теории многократного рассеяния волн. Излучение, проходя через лесной массив, с увеличением дальности ослабляется экспоненциально за счет рассеяния и поглощения деревьями. Для низкорасположенного и поднятого над лесом корреспондирующих пунктов на расстоянии свыше 300 – 400 м интенсивность излучения ослабляется пропорционально квадрату расстояния между ними. Для дальностей порядка 100 – 300 м важно влияние и прямой и пространственной волн. Для двух низкорасположенных на достаточно больших расстояниях пунктов механизм распространения УКВ оказывается подобным распространению волн вдоль земной поверхности. Интенсивность сигнала в этом случае убывает пропорционально четвертой степени расстояния. Рассеянные лесным массивом волны дают несущий вклад, убывающий пропорционально квадрату расстояния. В целом, результаты позволяют прогнозировать условия радиосвязи в лесных районах в зависимости от длины трассы, высот антенн, частоты, параметров лесного массива и земли. Кроме того, полученные результаты могут быть применены при решении обратных задач,

необходимых для исследования лесов радиофизическими методами. Ослабление поля в лесной среде для двух низкорасположенных на больших расстояниях корреспондирующих пунктов изображено на рисунке 7. А ослабление поля в лесной среде для низкорасположенного и поднятого над лесом корреспондирующих пунктов показано на рисунке 8.

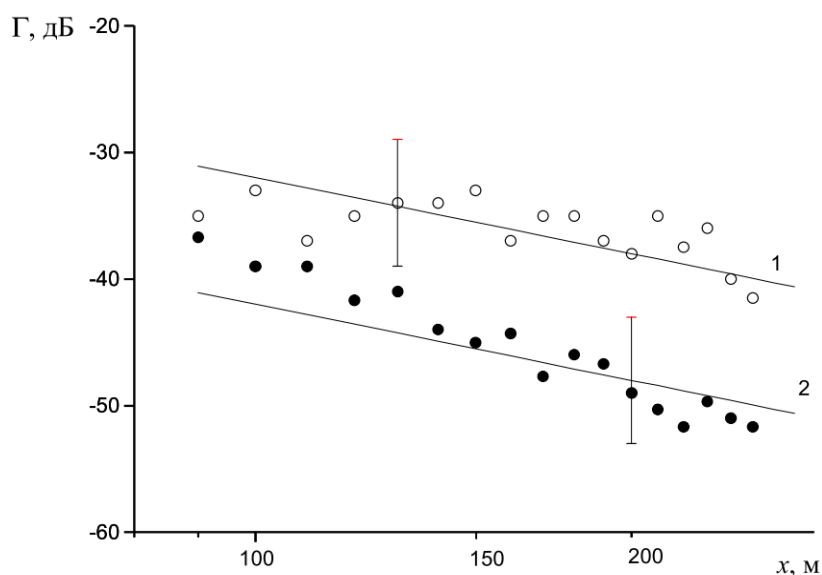


Рисунок 7 – Ослабление поля в лесной среде для двух низкорасположенных на больших расстояниях корреспондирующих пунктов [27]

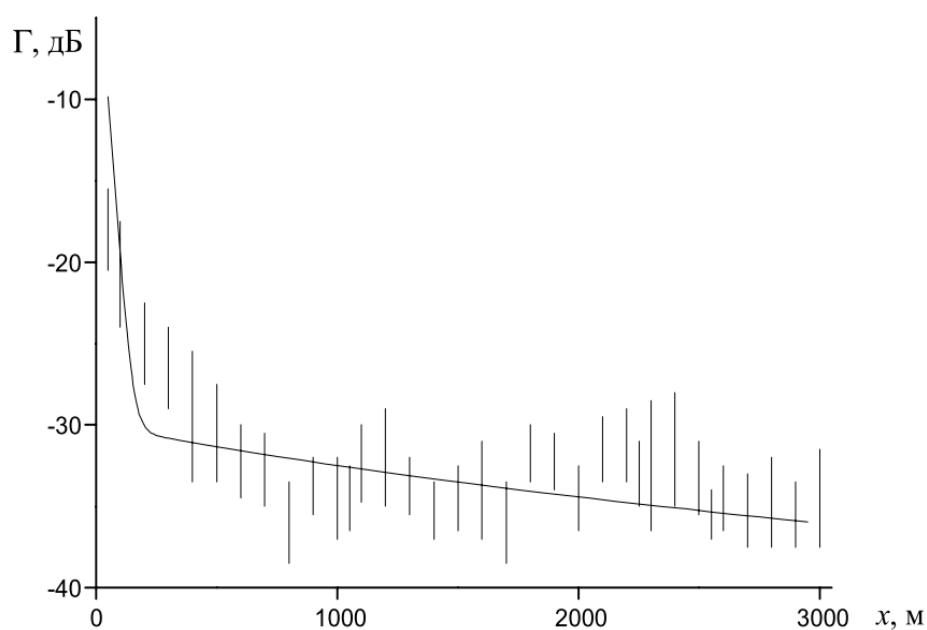


Рисунок 8 – Ослабление поля в лесной среде для низкорасположенного и поднятого над лесом корреспондирующих пунктов [27]

Однако применение моделей леса для описания процессов распространения радиоволн в лесу было бы невозможным без лабораторных и теоретических исследований. В силу экономии ресурсов, времени и материальных средств эти исследования являются наиболее распространёнными, но не менее важными. Использование данных дистанционного мониторинга лесного покрова стимулирует появление новых методов анализа физических свойств растительности, что несомненно является огромным вкладом в суть закономерностей распространения радиоволн в лесу.

Примером такого исследования является работа Ф.Э. Гулиевой [30], где целью проводимого модельного исследования являлось выявление возможности дистанционного определения суммарной биомассы в частично новопосаженных лесных массивах в оптимальном режиме с высокой достоверностью. Техническая реализация оптимального режима достигалась соответствующими математическими вычислениями режима измерений исследуемого участка в лесном массиве. По итогам данной работы был выявлен новый метод, позволяющий путем предварительной грубой оценки и определения участка с минимальной биомассой определить более точную величину суммарной биомассы исследуемого участка.

Как было сказано выше, использование данных дистанционного мониторинга не только помогает сэкономить время и ресурсы, но и позволяет повысить точность прогнозирования и дистанционного мониторинга многочисленных процессов на Земле. В связи с этим в последнее время наблюдается рост спроса на архивные базы данных Sentinel и USGS Landsat.

Так в работе Е. А. Дюкарева [31] для классификации наземного покрова КУ “Икса-Бакчар” использовались космические снимки спутника Landsat 7. Целью работы являлось исследование растительного покрова болотных экосистем по спутниковым данным. По итогам данной работы была построена временная динамика среднегодовых значений индекса растительности за 2000–2011 гг., представленная на рисунке 9, а также было заключено, что полученные результаты демонстрируют широкие возможности использования материалов спектрозональных спутниковых съемок для анализа состояния растительности болотных экосистем.

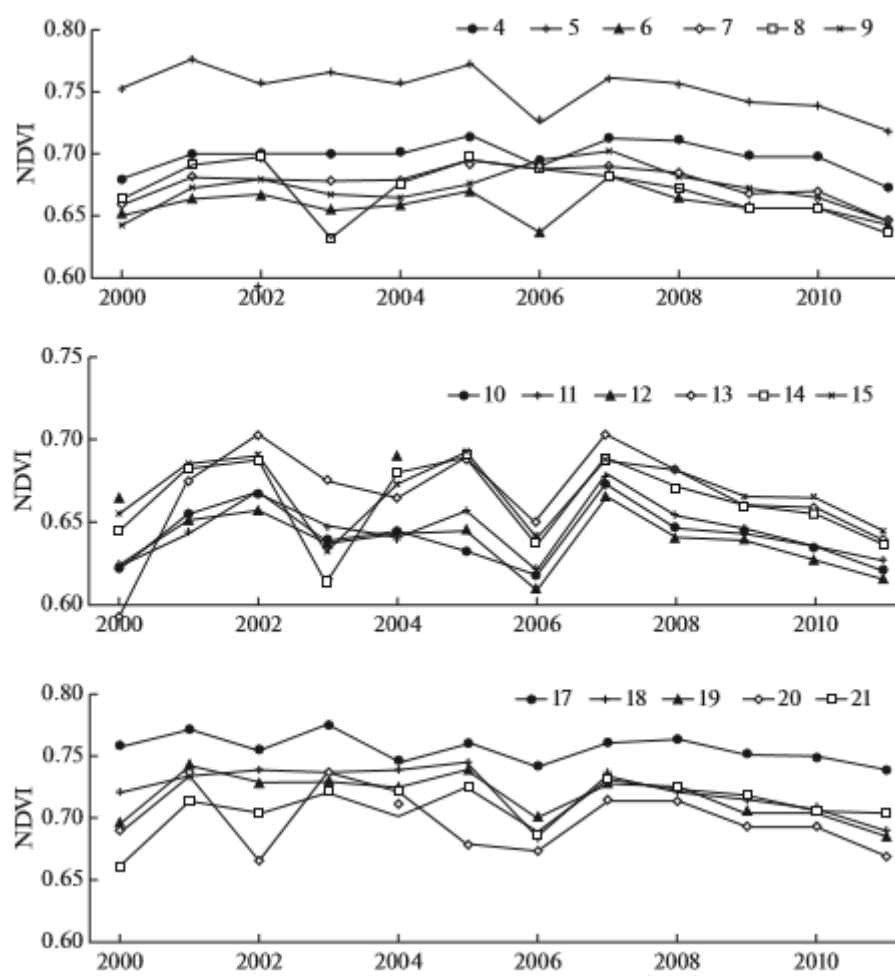


Рисунок 9 – Временная динамика среднегодовых значений индекса растительности за 2000–2011 гг [31]

А в работе Н.В. Родионовой [32] использовались радарные данные Sentinel 1A. Цель данной работы заключалась в рассмотрении вопросов изменения коэффициента обратного рассеяния от лесных покровов и неиспользуемых земель на территории Подмосковья за годичный период 2015–2016 гг. В ходе данного исследования были построены графики изменения коэффициента обратного рассеяния от лесных покровов в зависимости от поляризации (рисунок 10), а также был получен график изменения температуры в Москве и значений реальной и мнимой частей диэлектрической проницаемости (рисунок 11). По итогам данной работы удалось связать изменение обратного рассеяния леса в течение года с изменениями диэлектрической проницаемости деревьев ϵ в той ее части, которая зависит от температуры.

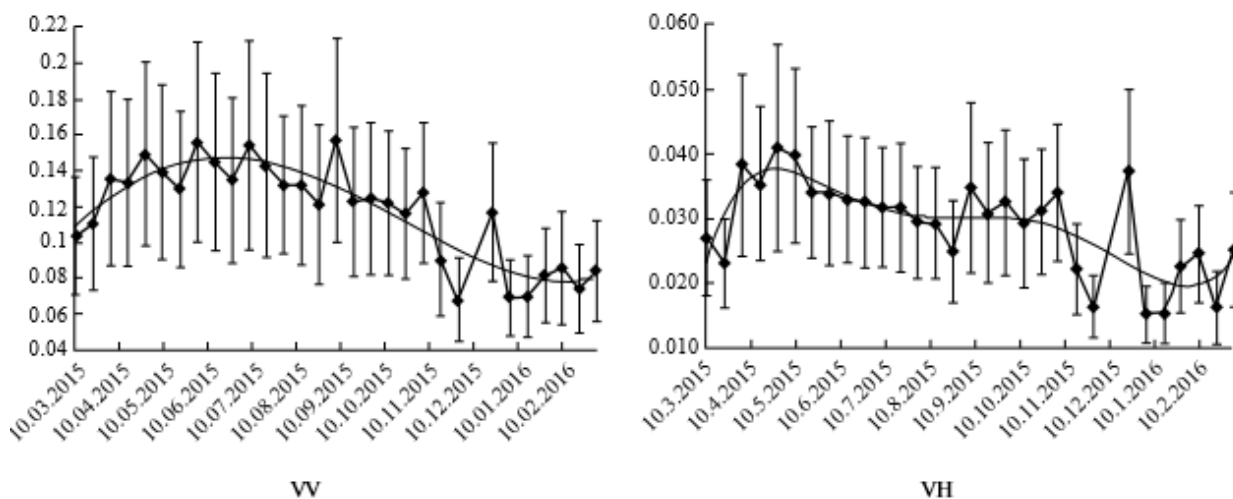


Рисунок 10 – Изменение коэффициента обратного рассеяния от лесных покровов в соответствующих поляризациях [32]

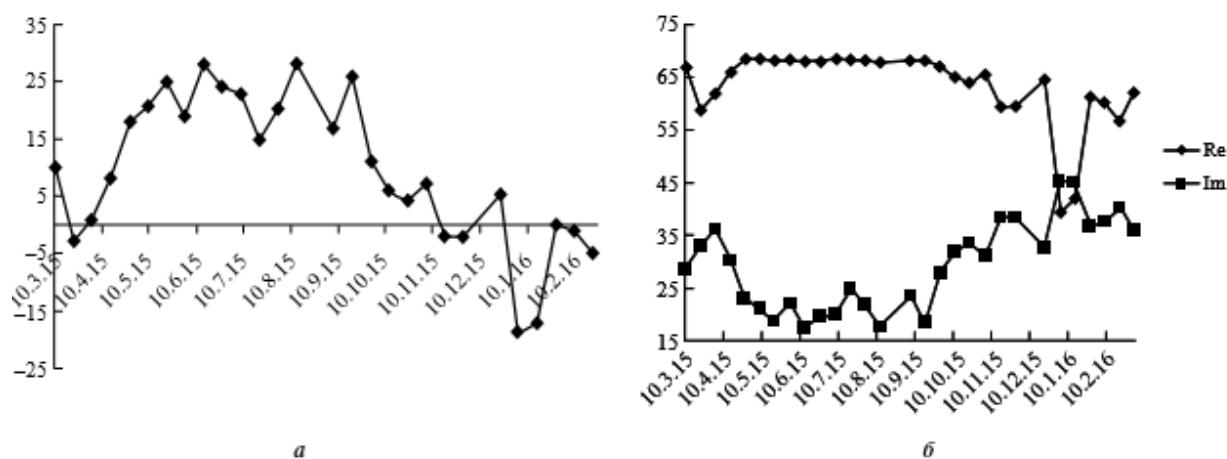


Рисунок 11 – Изменение температуры в Москве (а) и значения в условных единицах реальной и мнимой частей диэлектрической проницаемости, зависящей от температуры (б) [32]

Теоретическое исследование физических свойств композиционных сред является не менее важным, чем экспериментальное. Так как экспериментальное измерение диэлектрических параметров в ряде случаев оказывается невозможным из-за отсутствия необходимого оборудования или образца материала, многие для моделирования физических свойств материалов, подвергаемых СВЧ-термообработке прибегают к использованию теории диэлектрических смесей (ДС). Ключевым моментом реализации этого подхода является исходная информация о свойствах всех компонент рассматриваемых композиционных сред и, в частности, воды, полярные молекулы которой взаимодействуют с СВЧ-полем в большинстве влагосодержащих сред.

К исследованиям такого рода можно отнести работу В.В. Комарова [33], в которой было проведено двухэтапное тестирование нескольких формул теории ДС для оценки

диэлектрической проницаемости влажной древесины при различных температурах. В данной работе были выбраны 12 моделей, включая две формулы Брауна, формулу Рейлиха, Бэтгчера, Бруггемана-Ханаи, Оделевского, Тинга, Ландау-Лифшица, Лоуенга, первую, вторую и третью модели Лихтеннекера. Анализ результатов расчета КДП влажной древесины, полученных с помощью выбранных моделей ДС, показал, что минимальная погрешность расчета функции $\varepsilon'(t, W, p)$ достигается лишь для одной модели Рейлиха-Оделевского. Что же касается мнимой части КДП, то ни одна из моделей теории ДС не позволяет добиться приемлемой аппроксимации зависимости $\varepsilon''(t, W, p)$. По итогам работы был построен график диэлектрической проницаемости на частотах 915 МГц и 2,45 ГГц, представленный на рисунке 12.

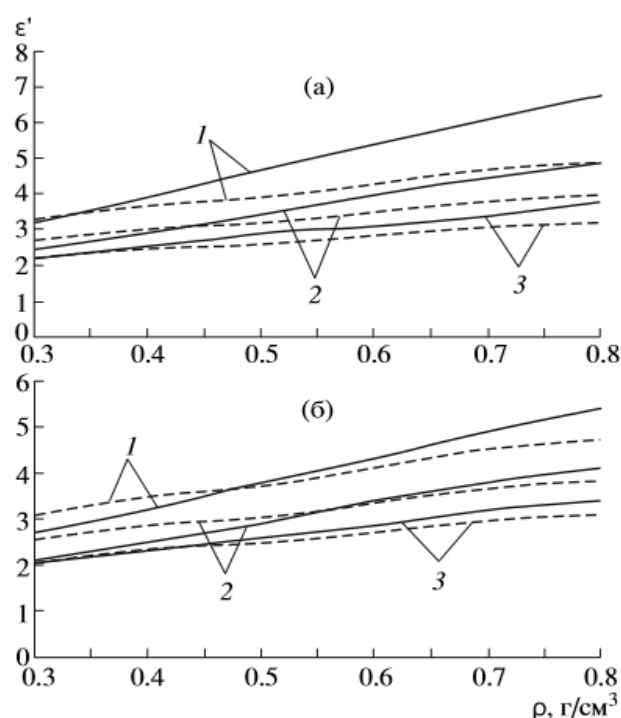


Рисунок 12 – Диэлектрическая проницаемость влажной древесины на частоте 915 МГц (а) и 2,45 ГГц (б): экспериментальные данные (сплошные линии) и результаты моделирования (пунктир): 1 – $t=20^\circ\text{C}$, $W=30\%$; 2 – $t=50^\circ\text{C}$, $W=20\%$; 3 – $t=90^\circ\text{C}$, $W=10\%$ [33]

Еще одной работой использующей данные ДЗЗ является статья В. С. Марчукова [34], в которой представлен метод автоматического определения участков замещений объектов и изменений границ растительного и почвенного покрова по результатам тематического дешифрирования данных ДЗЗ. В данном методе для повышения достоверности результатов автоматизированного дешифрирования применяется многоуровневая тематическая классификация с использованием структурно пространственной информации об объектах. На рисунке 13 представлена общая блок-схема дешифрирования каждого элемента временного ряда с использованием многоуровневой классификации.

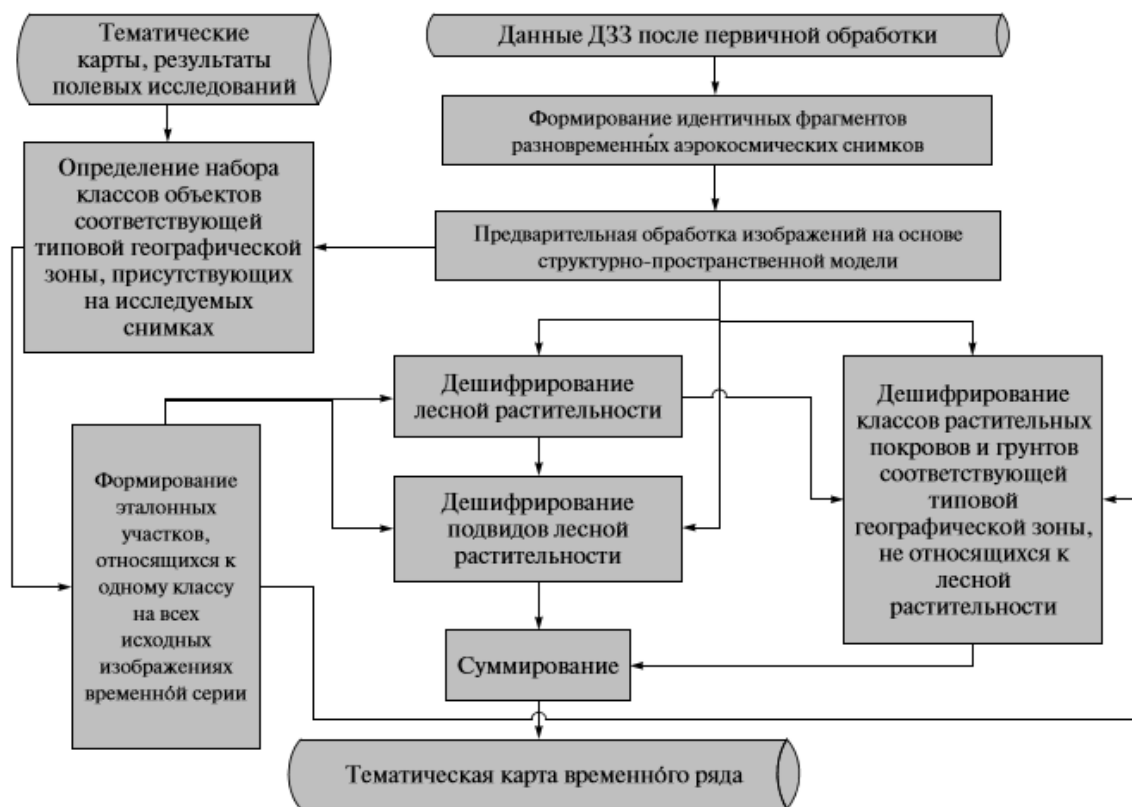


Рисунок 13 – Общая блок-схема дешифрирования изображений временного ряда [34]

По итогам данной работы было выявлено, что данный метод позволяет с высокой точностью определять площади, занимаемые растительным покровом и грунтами, по многозональным данным с разрешением 30 м.

2 Экспериментальная часть

2.1 Коаксиально-волноводный метод

2.1.1 Описание установки

На рисунке 14 приведена функциональная схема, в которую включен векторный анализатор цепей Agilent Technologies PNA E8363B, содержащий в себе разъем, гибкий коаксиальный кабель, коаксиальный кабель с диэлектрическим заполнением, переход от одного диаметра коаксиала к другому, и соответственно коаксиальная измерительная ячейка. Векторный анализатор применяется в составе автоматизированного измерительного стенда для проверки специализированных СВЧ, для измерений комплексных S-параметров двух- и четырехполюсных устройств в коаксиальных трактах и СВЧ устройств.

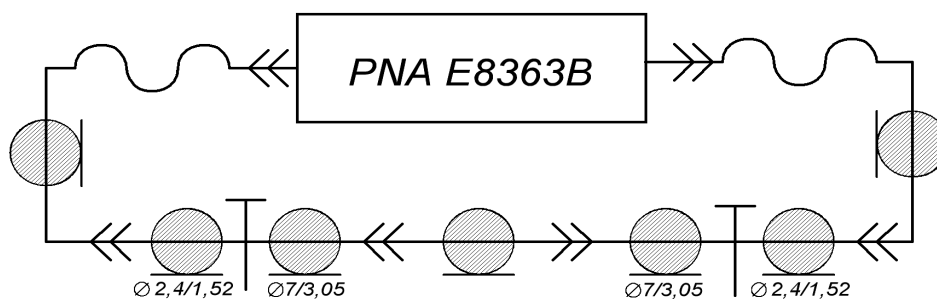


Рисунок 14 – Функциональная схема установки

На рисунке 15 изображена измерительная ячейка, которая представляет собой отрезок коаксиальной линии с двумя шайбами из фторопласта внутри. Шайбы предназначены для удержания образца в ячейке. Одна шайба зафиксирована на центральном проводнике, вторая шайба съёмная.

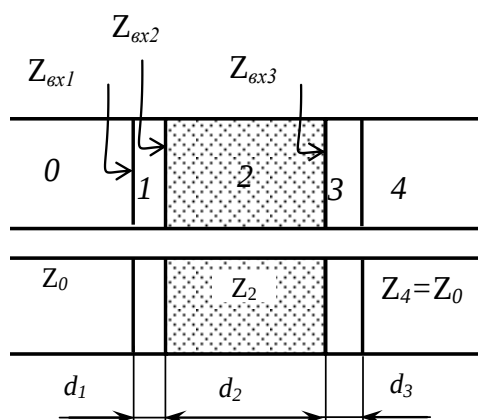


Рисунок 15 – Схема измерительной коаксиальной ячейки [35, 36]

Образец 2 (рисунок 15) помещается в коаксиальную ячейку между двумя шайбами из фторопласта 1 и 3. Среды 0 и 4 – воздух. Важным условием было плотное прилегание образцов к проводникам и стенкам коаксиальной ячейки, нарушение которого приводит к увеличению погрешности измерений.



Рисунок 16 – Коаксиальные измерительные ячейки

На рисунке 16 представлены коаксиальные измерительные ячейки, диаметр внутреннего проводника которого составляет 3,04 мм, внешнего – 7 мм. Длина ячеек варьируется в диапазоне 17–57 см. Передающие линии сечением 7/3,04 мм имеют единственный распространяющийся тип волны ТЕМ при воздушном заполнении вплоть до 18 ГГц. При заполнении измерительной ячейки диэлектриком с $\epsilon' > 1$ появляется возможность распространения высших типов волн (в первую очередь H_{11}) на частотах ниже 18 ГГц. Исходя из этого, возникает необходимое условие однородности образца.

2.1.2 Методика измерения

Коаксиальная ячейка, заполненная образцом, с помощью фазостабильных кабелей подключается к двум портам векторного анализатора цепей, как показано на рисунке 17.

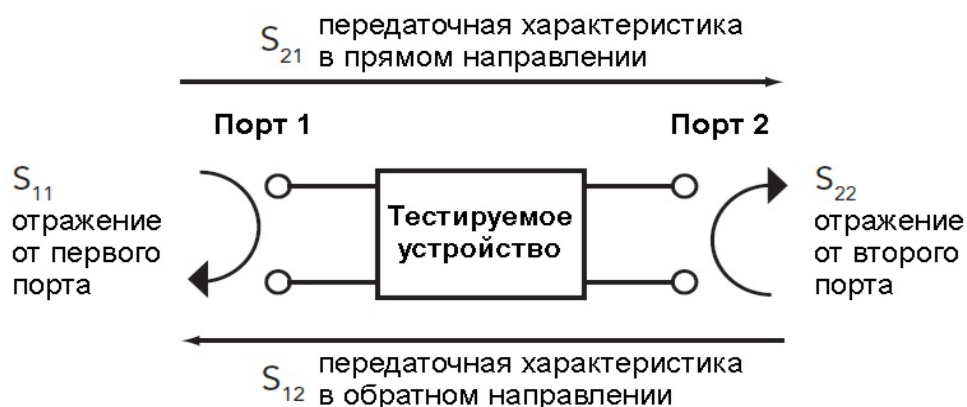


Рисунок 17 – Определение S-параметров тестируемого четырёхполюсного устройства [37]

Векторный анализатор параметров цепей после стандартной процедуры калибровки измеряет параметры матрицы рассеяния четырехполюсника ячейки: S_{11} и S_{12} . Четырехполюсник подключен между разъемами соединительных кабелей, т.е. структуры, содержащей кроме образца отрезки линий передачи, заканчивающиеся разъемами для присоединения кабелей. При условии малых потерь энергии в отрезках линии передачи будет происходить только изменение фазы, а за модули коэффициентов отражения и прохождения будут отвечать потери в образце.

В связи с тем, что комплексные параметры матрицы рассеяния имеют действительную и мнимую части, КДП образца можно определять через измерение только одного из них. Если анализатор цепей измеряет только модули коэффициентов передачи и отражения, то есть возможность использования только модулей параметров матрицы рассеяния S_{11} и S_{12} .

2.1.3 Подготовка образцов

Объектом исследования являются породы «живой» древесины, образцы листьев, хвои, веток разной толщины – элементов кроны березы, ели, сосны, тополя и лиственницы.

Для измерения комплексной диэлектрической проницаемости в коаксиальной линии передачи было необходимо из веток и листьев (хвои) деревьев изготовить образцы малых размеров (рисунок 18). Малые размеры образцов обусловлены необходимостью плотного заполнения измерительной ячейки для уменьшения погрешностей измерений.



Рисунок 18 – Образец хвои сосны для заполнения ячейки

Влажность элементов дерева в данной работе определялась следующим образом: измерялась масса влажного образца, затем проводились измерения диэлектрической проницаемости. После полного высыхания образца измерялась его масса.

Влажность древесины в процентах высчитывается по формуле (9).

$$W(\%) = \frac{m - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}}} * 100\%, \quad (9)$$

где m – масса влажного образца элементов дерева; $m_{\text{сух}}$ – масса образца в абсолютно сухом состоянии.

2.2 Резонаторный метод

2.2.1 Описание установки

На рисунке 19 приведена функциональная схема, в которую включен векторный анализатор цепей Agilent Technologies PNA E8363B, содержащий в себе генератор качающейся частоты и детекторную секцию, коаксиальный кабель, переход от одного диаметра коаксиала к другому, коаксиально-волноводный переход, элемент связи – отверстие, реализованное в емкостной диафрагме, прямоугольный многомодовый резонатор. Векторный анализатор применяется в составе автоматизированного измерительного стенда для проверки специализированных СВЧ, для измерений комплексных S -параметров двух- и четырехполюсных устройств в коаксиальных трактах и СВЧ устройств. Принцип действия анализатора основан на возможности отдельных измерений, падающей и отраженной волн сигнала с применением направленного ответвителя.

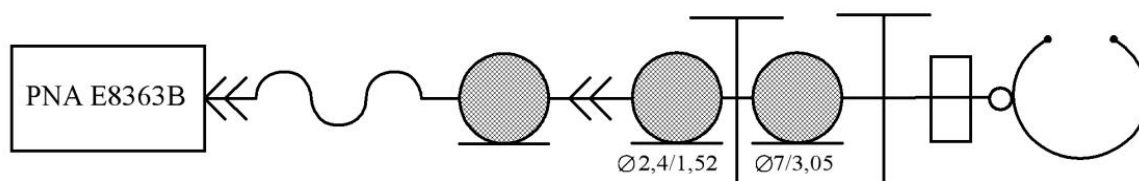


Рисунок 19 – Функциональная схема установки

При исследовании электромагнитных параметров образцов изучаемых материалов используется один из частных типов колебания H_{01q} . В качестве измерительной ячейки используется прямоугольный многомодовый резонатор. Используемый резонатор имеет амплитудно-частотную характеристику из 13 мод. Исследования были проведены на фиксированной частоте 4,286 ГГц.

В прямоугольном многомодовом резонаторе можно определить электрофизические параметры древесины, композитных материалов, почв и жидкостей.

2.2.2 Методика измерения

В данной работе измерения проводились на прямоугольном многомодовом резонаторе. Этот резонатор представляет собой отрезок прямоугольного волновода, замкнутый с обоих концов проводящими пластинами. В данном резонаторе имеется возможность возбуждения H_{mnp} и E_{mnp} типа колебаний, где m , n , p – индексы колебаний, соответствующие числу полуволн, укладываемых вдоль соответствующих стенок резонатора.

Метод измерения базируется на сравнении резонансных частот, измеренных на пустом резонаторе и с помещенным в резонатор образцом. Резонансная частота при внесении образца в резонатор сдвигается в сторону меньшей частоты от резонансной частоты пустого резонатора. Это можно увидеть на рисунке 20. Также можно заметить, что резонансная кривая при внесении образца расширяется относительно резонансной кривой пустого резонатора, это происходит из-за снижения добротности. Измерения проводились в следующей последовательности: после каждого измерения массы образца, измерялась диэлектрическая проницаемость. Это происходило до тех пор, пока масса образца не достигла постоянства.



Рисунок 20 – Резонансные кривые

На рисунке 21 представлен отрезок прямоугольного волновода с сечением $a \times b$, и длиной l . Волна движется в сторону возрастания координаты z .

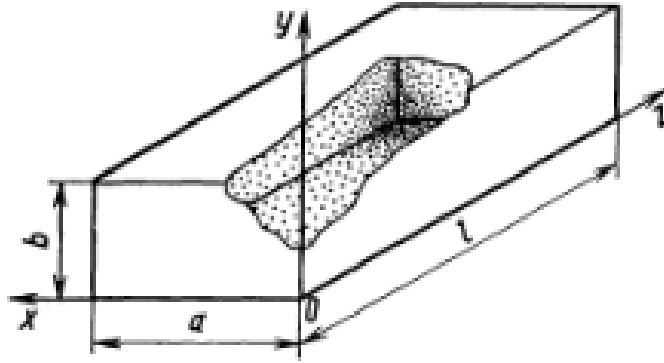


Рисунок 21 – Прямоугольный резонатор

Распределение электрического поля в прямоугольной системе координат x, y, z можно записать в виде:

$$\begin{aligned} E_x &= A * \cos\left(\frac{m * \pi}{a} * x\right) * \sin\left(\frac{n * \pi}{b} * y\right) * \sin\left(\frac{q * \pi}{l} * z\right), \\ E_y &= B * \sin\left(\frac{m * \pi}{a} * x\right) * \cos\left(\frac{n * \pi}{b} * y\right) * \sin\left(\frac{q * \pi}{l} * z\right), \\ E_z &= C * \cos\left(\frac{m * \pi}{a} * x\right) * \sin\left(\frac{n * \pi}{b} * y\right) * \sin\left(\frac{q * \pi}{l} * z\right), \end{aligned} \quad (10)$$

где A, B, C – числовые коэффициенты. Резонансное значение длины волны в волноводе получается из решения уравнений (10), и имеет вид:

$$\lambda_{\text{рез}} = \frac{2 * \pi}{h_{\text{рез}}} = \frac{2 * l}{q}, \quad (11)$$

где $h_{\text{рез}}$ – резонансное значение, q – любое целое положительное число (кроме нуля), l – длина волновода.

Важно уточнить, что длина волны возбуждающего источника, не должна быть меньше резонансной длины волны. Так же из решения (10) видно, что каждому значению q соответствует своя длина волны и структура распределения электрического поля, что как раз и называют типом колебаний в прямоугольном резонаторе. Типы колебаний в резонаторе и типы волн в волноводах называют модами.

Будем считать, что прямоугольный волновод имеет идеально проводящие стенки и замкнутую полость. Тогда ось z является осью стоячей волны, а в плоскости $ХОУ$ устанавливается распределение электрического поля.

Находим объем резонатора, используя известные нам параметры: длины, ширины, высоты. Следующим этапом расчета является нахождение объема образца, для этого необходимо знать его длину и площадь сечения. Зная все эти данные, можно найти действительную часть диэлектрической проницаемости среды по формуле (12).

$$\varepsilon' = 1 - \frac{V_c}{2 * V_s} * \left(\frac{2 * \Delta f}{f_0} \right) \quad (12)$$

где $V_c = a * b * l$ – объем резонатора, $V_s = V_0 * (b/L)$ – объем исследуемого образца (b – высота резонатора, L – длина образца, $V_0 = S * L$ – объем образца, S – площадь сечения); Δf – разность минимальных частот пустого резонатора и с образцом, (уход резонансной частоты); f_0 – минимальная частота пустого резонатора.

Нахождение мнимой части диэлектрической проницаемости производится по формуле (13):

$$\varepsilon'' = \frac{V_c}{2 * V_s} \left(\frac{f_2 - f_1}{2 * f} - \frac{f_{02} - f_{01}}{2 * f_0} \right), \quad (13)$$

где f, f_0 – минимальные частоты резонансных кривых с образцом и без образца; f_2, f_{02}, f_1, f_{01} – частоты на уровне половинной мощности с образцом и без образца, соответственно.

2.2.3 Подготовка образцов

Объектом исследования являются породы «живой» древесины такие, как ель, сосна, береза и яблоня (рисунок 22).

Для измерения комплексной диэлектрической проницаемости на прямоугольном многомодовом резонаторе требовалось из пород древесины изготовить образцы прямоугольной формы. Исследуемые образцы имели вид длинных стержней с сечением в среднем 2×2 мм². Основные требования, предъявляемые к образцам в работе – размеры образца много меньше размеров резонатора, и соответственно, много меньше длины волны в нем. Для применения резонансного метода существуют ограничения, накладываемые на геометрические параметры образца и расположения его в резонаторе (строго по центру), все это делается в целях уменьшения погрешности.



Рисунок 22 – Образец для исследования

Для каждой породы дерева (береза, яблоня, ель, сосна) было изготовлено по 4 образца. Перед началом измерений определялись размеры сечения образцов с помощью штангенциркуля (погрешность $\pm 0,01$ мм) и масса на весах Shimadzu AUX – 320 53 (погрешность $\pm 0,00005$ г).

В данном методе влажность образцов определялась в той же последовательности, что и в коаксиально-волноводном методе, описанном выше.

2.3 Метод открытого конца коаксиала

2.3.1 Описание установки

Экспериментальная установка, блок-схема которой представлена на рисунке 23 позволяет исследовать диэлектрическую проницаемость в диапазоне частот от 500 МГц до 40 ГГц и интервале температур – 30...+ 60 °С с переменным шагом от 0.1 К. Она состоит из: 1) анализатора цепей Agilent Technologies PNA E8363B, 2) датчика в виде коаксиального зонда, 3) измерителя сопротивлений E7-8.

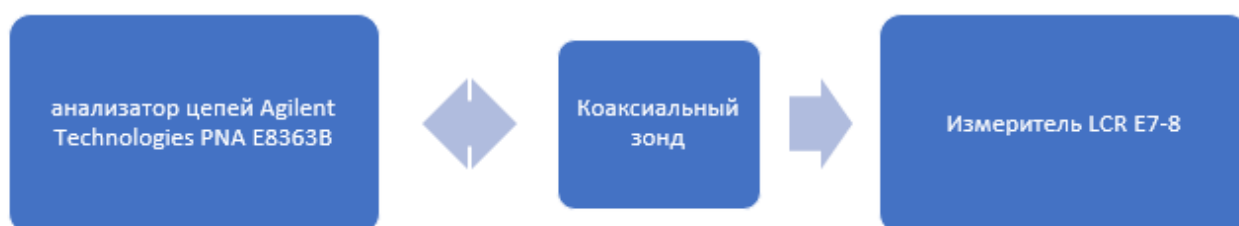


Рисунок 23 – Функциональная схема установки

В данной работе для измерения диэлектрической проницаемости жидкостей используется датчик в виде разомкнутого коаксиального зонда (рисунок 24).

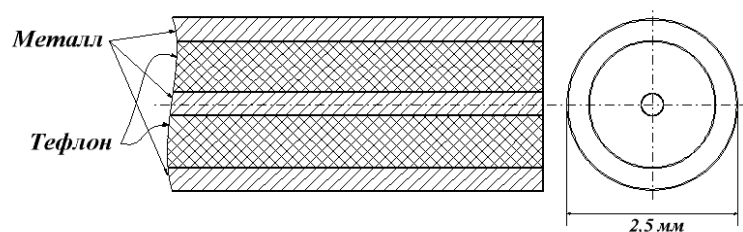


Рисунок 24 – Конфигурация разомкнутого коаксиального зонда

Используемый зонд изготовлен на основе жесткого коаксиального кабеля с тефлоновым диэлектрическим заполнением, внутри которого по всей длине располагается металлический стержень. Это устройство способно эффективно измерять параметры диэлектриков в большом диапазоне температур, частот и значений тангенса угла диэлектрических потерь. Кроме этого, коаксиальный зонд удобен в эксплуатации.

Выбор геометрических параметров зонда определяется компромиссом между наименьшей частотой, на которой могут осуществляться измерения, и исследуемым объемом.

2.3.2 Методика измерения

Измерения с использованием данного метода проходили на территории корпуса РФФ ТГУ. В качестве образцов были выбраны ели и лиственницы, растущие на этой территории. В самом начале измерений определялась температура воздуха и дистиллированной воды, диаметр исследуемого дерева, расстояние от корневой системы до места расположения отверстия. С помощью коротко замыкателя проводилась калибровка векторный анализатор цепей. Далее перпендикулярно поверхности дерева создавалось углубление диаметром 3 мм. В данное отверстие помещался пробник и измерялась диэлектрическая проницаемость и коэффициент отражения. Данная процедура повторялась 3 раза, слегка вынимая пробник и прижимая его вновь. Первое измерение проводилось на коре дерева, затем на границе коры и заболони. После этого углубление увеличивали на 2 см и повторяли измерения. Так продолжалось до тех пор, пока углубление не достигало середины дерева. После намечалось место для второго отверстия, которое должно было быть на 2 см выше и на 20 ° правее предыдущего. Те же измерения проводились и во втором отверстии.

3 Результаты измерений и обсуждения

3.1 Результаты измерения коаксиально-волноводным методом

В первую очередь, было начато экспериментальное исследование диэлектрических свойств элементов дерева - листьев и веток. Измерения проводились в диапазоне частот от 10 МГц до 18 ГГц. ДЗЗ производится с помощью спутников, которые работают на фиксированных частотах. Поэтому в нашем случае была выбрана одна из таких частот – 14 ГГц. После были выбраны значения на данной частоте и построены зависимости коэффициента прохождения волны от времени года. Также была рассчитана влажность образцов. Ниже приведены результаты измерений.

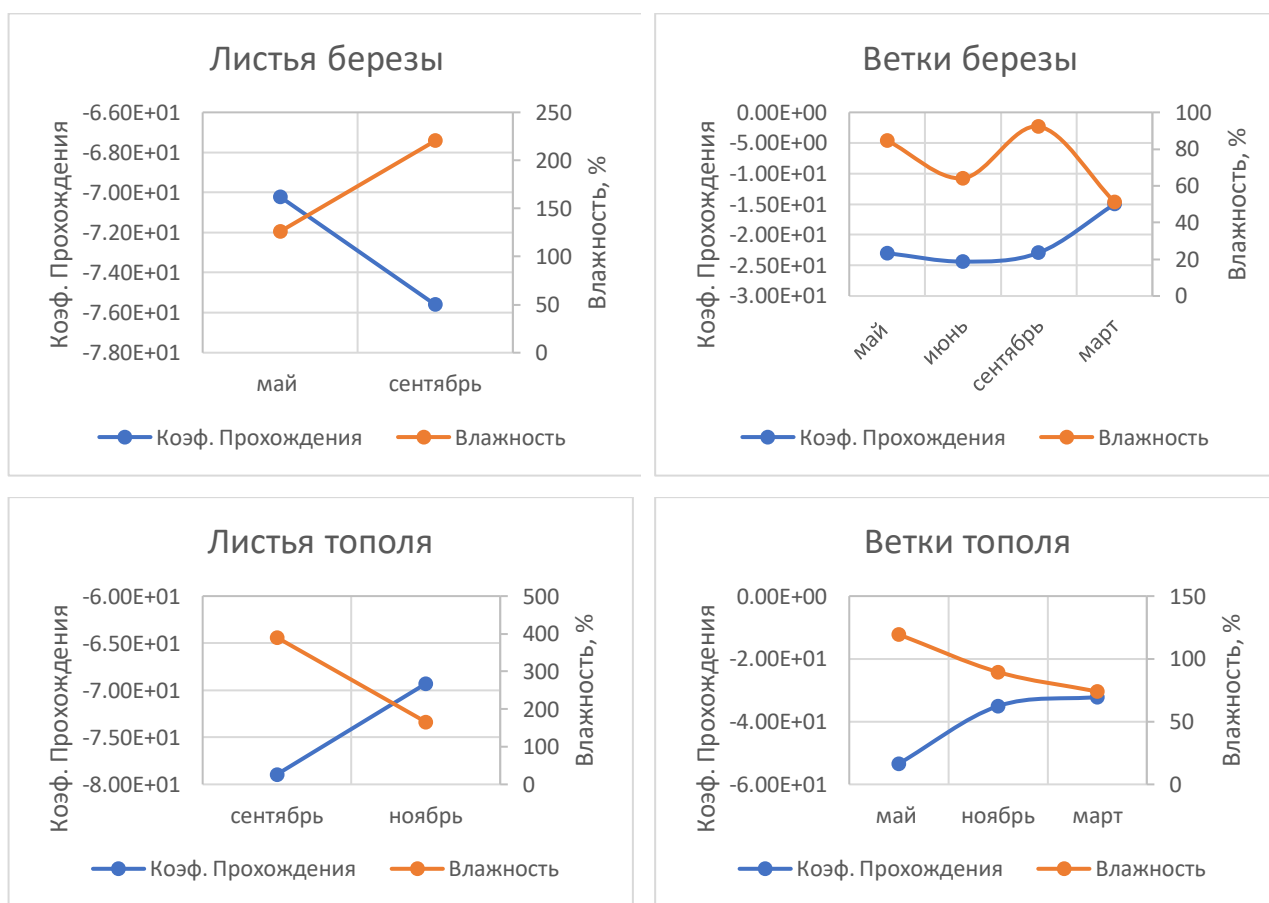


Рисунок 25 – Зависимость коэффициента прохождения волны и влажности в лиственных породах дерева от времени года

На рисунке 25 представлены графики зависимости коэффициента прохождения в коаксиальной ячейке, заполненной лиственными породами древесины, относящихся к разным временам года. Из графика видно, что диэлектрические свойства лиственных пород зависят от их влагосодержания и структуры в соответствии с периодом, в который они были измерены. Характер поведения линий влажности характеризуется движением влаги в дереве в соответствии с временем года. При наступлении весны влага из корней деревьев поднимается

по стволу к веткам, после происходит процесс создания новых клеток, что ведет к образованию почек, а затем листьев. Поэтому в этот период года влажность веток повышается, что ведет за собой уменьшение коэффициента прохождения волны. А при наступлении осени происходит обратный процесс, что повышает коэффициент прохождения волны.

Из графиков видно, что диэлектрические свойства веток и листьев существенно различаются, поэтому следует учитывать их в моделях как отдельные элементы.

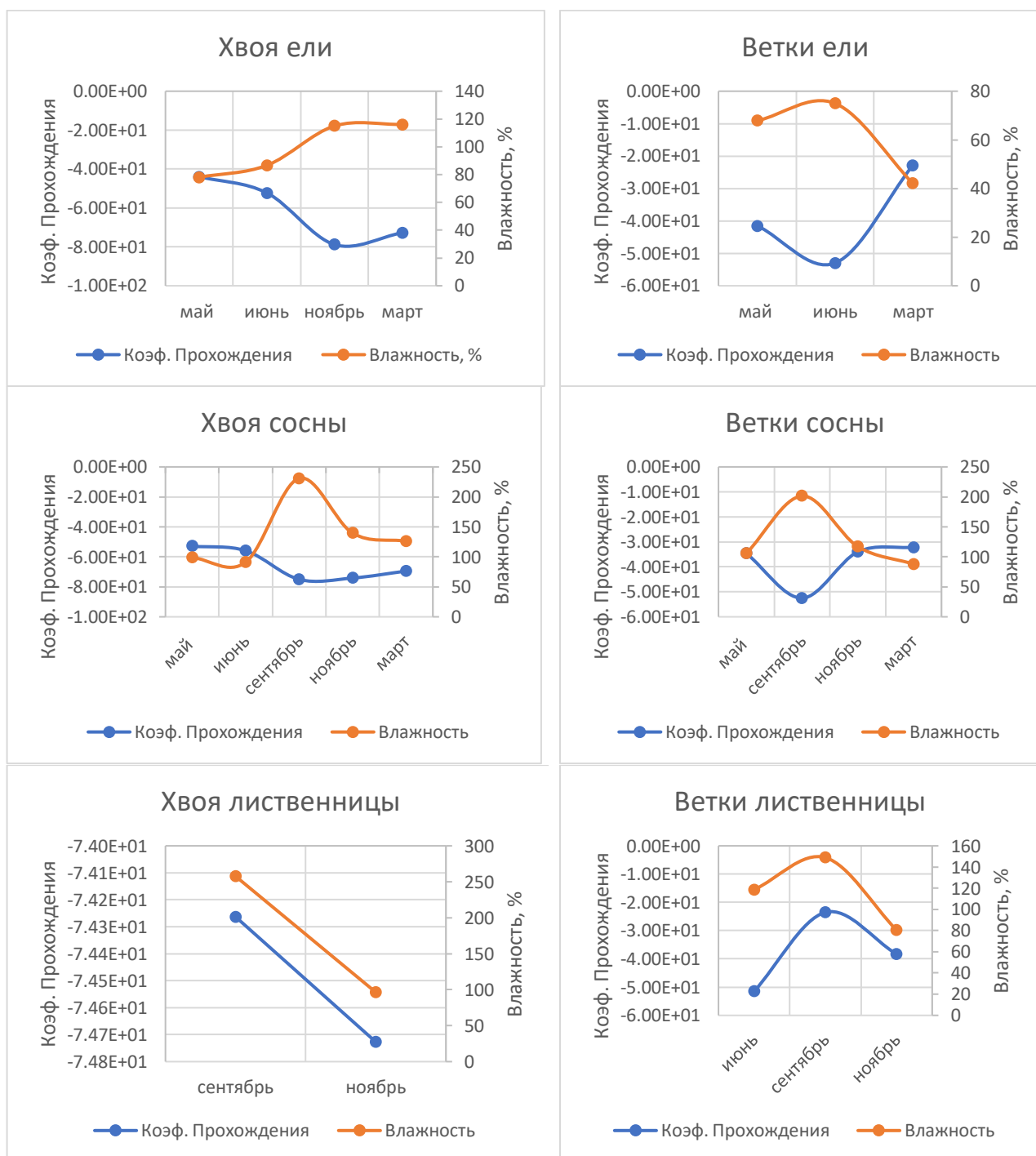


Рисунок 26 – Зависимость коэффициента прохождения волны и влажности в хвойных породах дерева от времени года

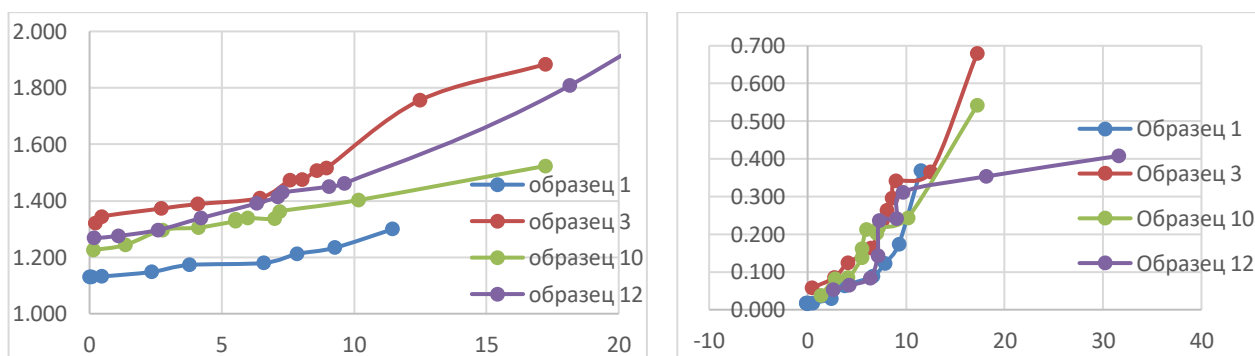
На рисунке 26 представлены графики зависимости коэффициента прохождения в коаксиальной ячейке, заполненной хвойными породами древесины, относящихся к разным временам года. Влажность хвои и веток деревьев колеблется от 50% до 250%. Такой высокий уровень влажности, по сравнению с лиственными породами древесины, связан с большим количеством смолы в элементах хвойных деревьев, что в совокупности понижает коэффициент прохождения волны.

Из графиков также видно, что электромагнитные отклики лиственных и хвойных деревьев различаются существенно. Это можно объяснить их химическим составом.

3.2 Результаты измерения резонаторным методом

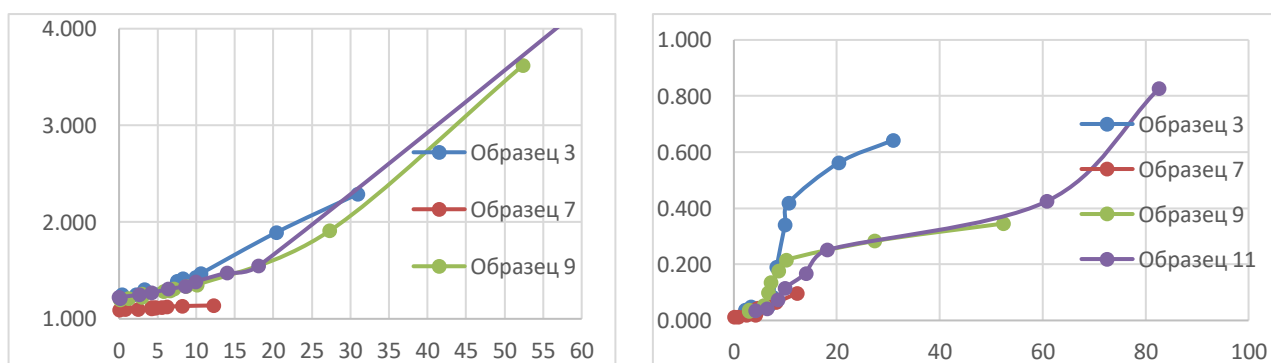
Резонаторный метод измерения электрических параметров материалов и характеристик широко применяется в различных диапазонах частот. В настоящее время существует много методов, они основаны на измерение параметров резонаторов, частично или полностью заполненных диэлектриком. В данной работе резонатор частично заполняется диэлектриком.

Постепенно высушивая образцы, измерялась диэлектрическая проницаемость на фиксированной частоте. Ниже приведены результаты измерений.



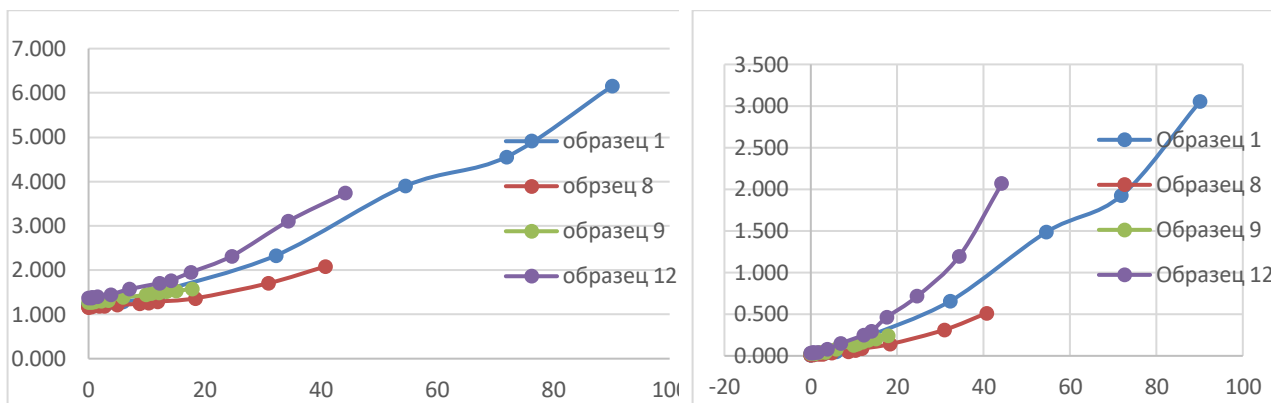
слева – действительная часть, справа – мнимая часть

Рисунок 27 – Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости яблони от влажности



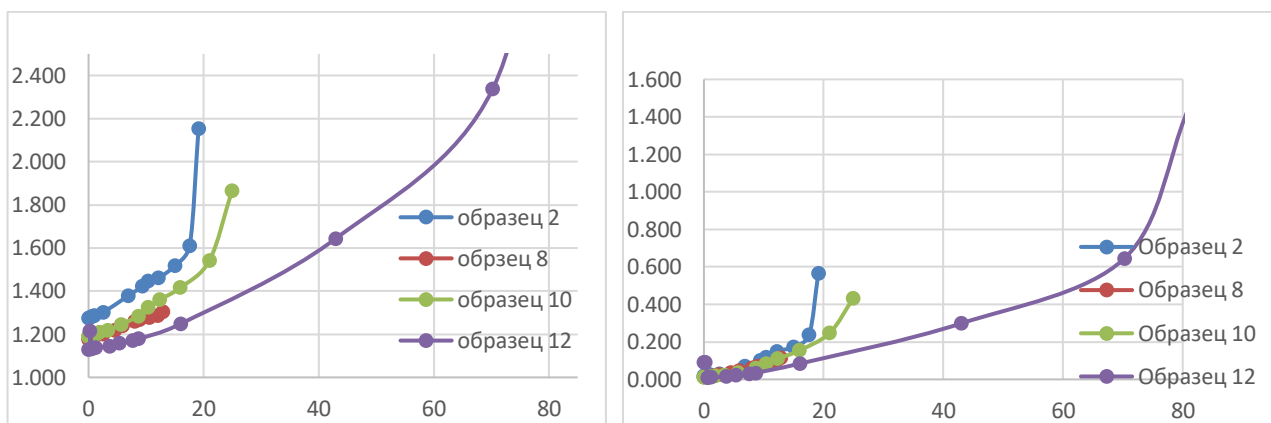
слева – действительная часть, справа – мнимая часть

Рисунок 28 – Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости березы от влажности



слева – действительная часть, справа – мнимая часть

Рисунок 29 – Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости ели от влажности



слева – действительная часть, справа – мнимая часть

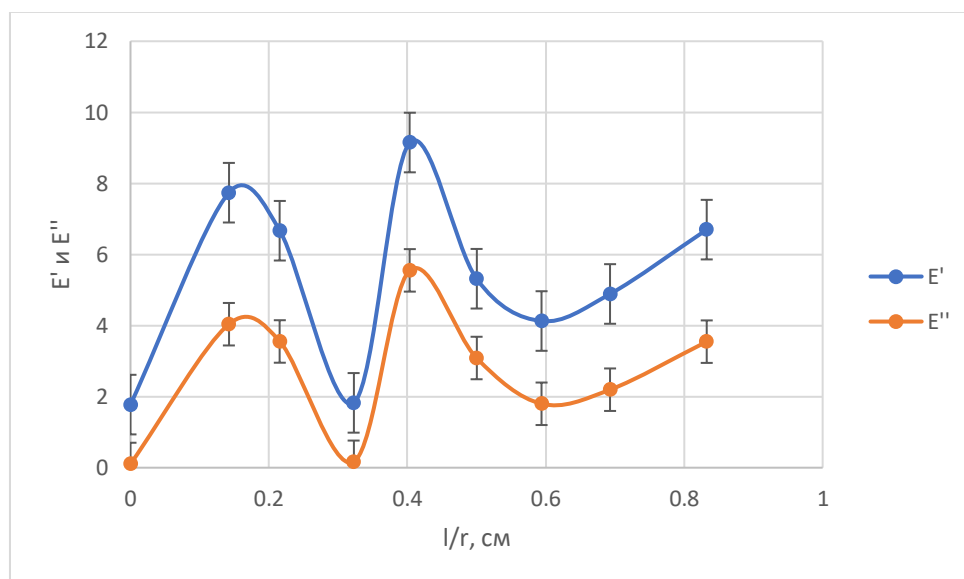
Рисунок 30 – Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости сосны от влажности

Для сравнения результатов измерения «живой» и «неживой» древесины были взяты итоги работы [38]. Данное сравнение показало, что диэлектрическая проницаемость – действительная и мнимая компоненты – для выдержанных образцов имеет большие значения, нежели для свежесрезанных образцов. Это объясняется состоянием влаги в древесине. В свежесрезанных образцах вода может находиться в клетках, в стенках клеток и в межклеточном пространстве. По мере уменьшения количества влаги, молекулы воды сначала исчезают из пространства между клетками, потом из стенок клеток, потом из самих клеток. В каждом из этих положений молекулы воды оказываются в разной степени связанности с органической основой древесины. Как известно, связанная вода имеет значение ДП значительно меньше, чем у свободной.

В выдержанной древесине молекулы воды остаются в межклеточном пространстве, как в капиллярах, связанные с органическими стенками – волокнами из целлюлозы и лигнина. По мере увеличения влажности вода переходит в более свободное состояние, и ее диэлектрическая проницаемость увеличивается.

3.3 Результаты измерения методом открытого конца коаксиала

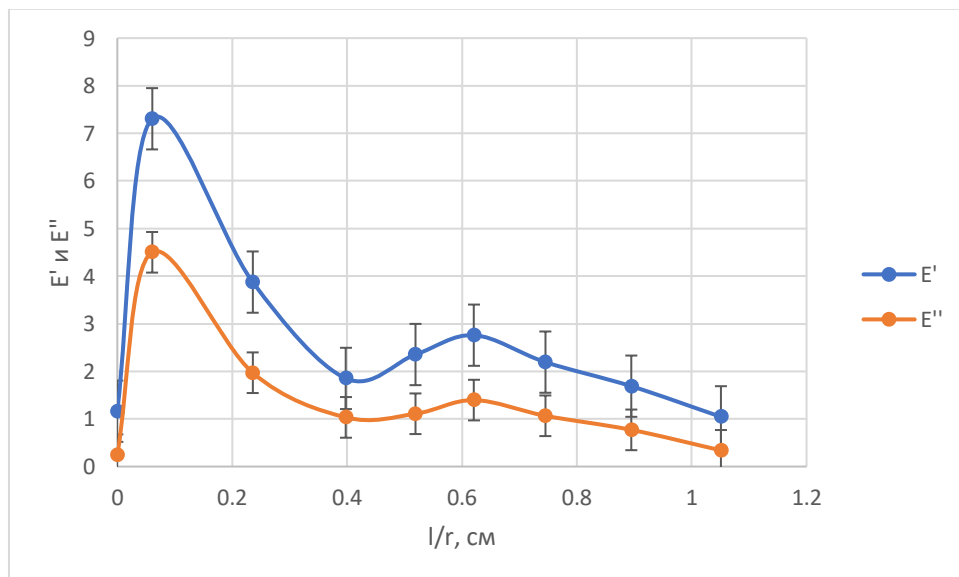
На рисунке 31 приведена зависимость действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости в радиальном направлении для лиственницы.



l – глубина погружения зонда, r – радиус ствола

Рисунок 31 – Зависимость действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости в радиальном направлении для лиственницы

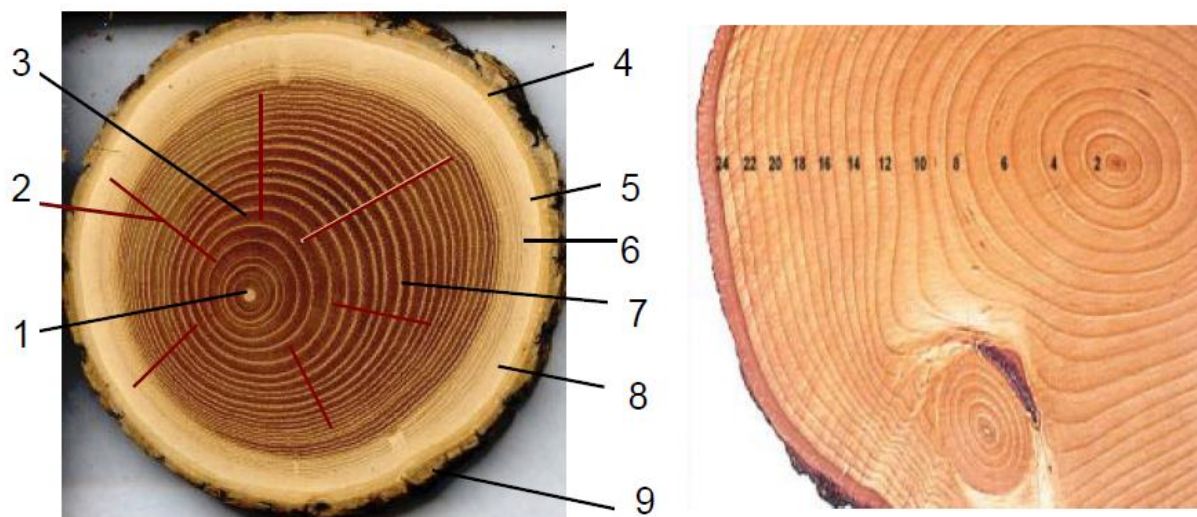
На рисунке 32 приведена зависимость действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости в радиальном направлении для ели.



l – глубина погружения зонда, r – радиус ствола

Рисунок 32 – Зависимость действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости в радиальном направлении для ели

Опираясь на структуру дерева, изображенную на рисунке 33, по графикам можно сделать вывод, что поведение линий действительной и мнимой частей связано с количеством влаги в том или ином слое. Первый скачок линий КДП связан с влажностью наиболее молодых и свежих первых слоев, называемых – заболонь.

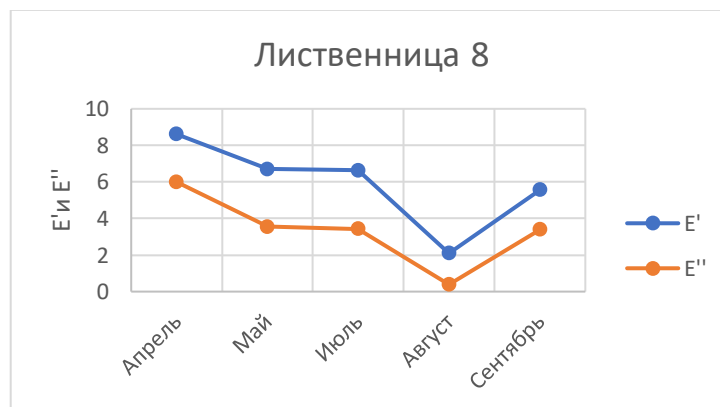
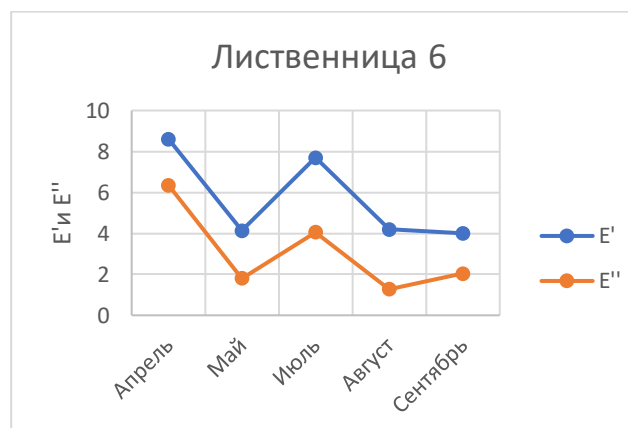
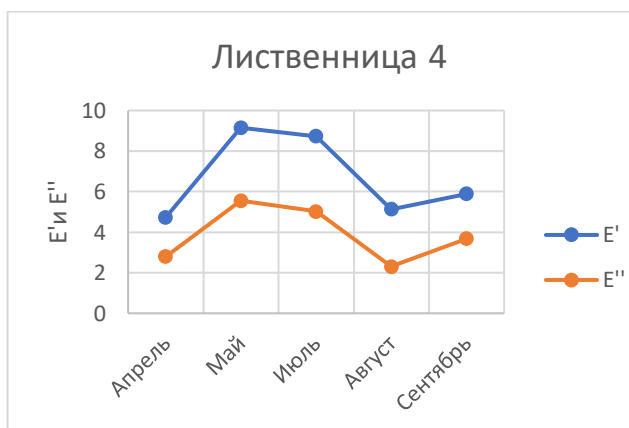


1 – сердцевина; 2 – сердцевинные лучи; 3 – ядро; 4 – пробковый слой; 6 – заболонь; 7 – годичный слой; 5, 8 – камбий; 9 – кора

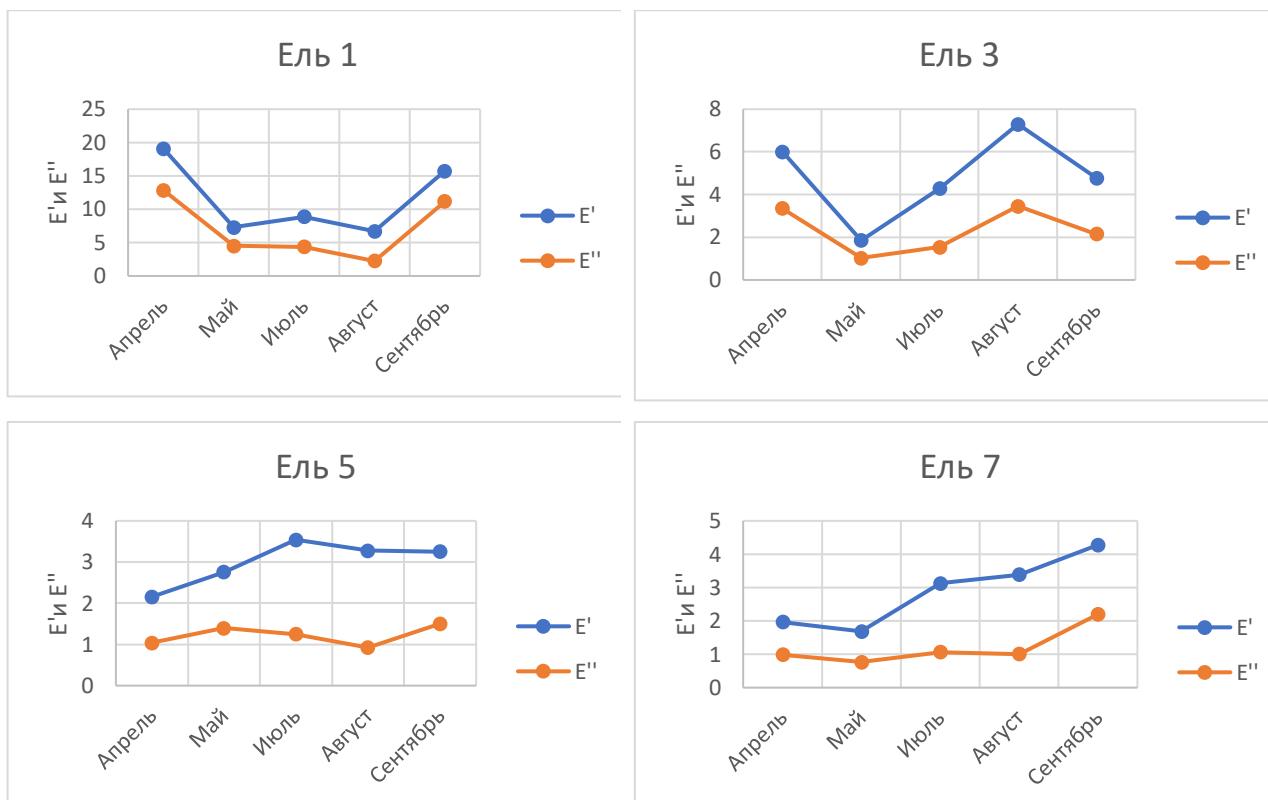
Рисунок 33 – Поперечный (торцевой) разрез ствола [39]

В процессе роста дерева стенки клеток древесины внутренней части ствола, примыкающей к сердцевине, постоянно изменяют свой состав, одревеневают и пропитываются у хвойных пород смолой, а у лиственных – дубильными веществами. Как следствие, пропускная способность для влаги этих слоев снижается. Этим объясняется уменьшение значений КДП. Второй скачок появляется из-за влаги, содержащейся в сердцевине, которая служит для пропуска питательных веществ. В зависимости от породы дерева водоносных слоев может быть несколько.

Также была построена зависимость действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости от времени года для определенных слоев дерева, которая представлена на рисунке 34 и на рисунке 35 для лиственницы и ели соответственно.



1 – камбий, 3,4 – заболонь, 6 – ядро, 8 – сердцевина
 Рисунок 34 – Зависимость действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости лиственницы от времени года для определенных слоев дерева



1 – камбий, 3, –заболонь, 5 – ядро, 7 – сердцевина

Рисунок 35 – Зависимость действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости лиственницы от времени года для определенных слоев дерева

Полученные результаты показывают, что потоки влаги внутри ствола дерева перераспределяются в течении года по слоям. Возрастание в начале апреля соответствует весеннему сокодвижению, которое постепенно снижается до августа. В сентябре начинается отток влаги в корневую систему, что также отражается на диэлектрической проницаемости большинства слоев. Таким образом, наблюдения с помощью измерения диэлектрической проницаемости позволяют определять все значимые фенологические явления в дереве. Знание о различном насыщении влагой слоев дерева в течении года позволит более точно интерпретировать результаты сканирования древесины в целях контроля состояния лесов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения дипломной работы было проведено исследование зависимости комплексной диэлектрической проницаемости различных пород древесины от частоты, влажности, времени года тремя различными методами.

В результате данной работы было сделано следующее:

- а) проведен анализ причин погрешностей коаксиального метода и определены пределы погрешности;
- б) определено распределение влаги внутри ствола дерева;
- в) исследованы различия между хвойными и лиственными деревьями по коэффициентам отражения для разных элементов дерева (листьев, хвои, веток и ствола);
- г) определена диэлектрическая проницаемость элементов дерева (листьев, веток, ствола) для построения диэлектрической модели дерева;
- д) был разработан стандарт организации для измерения КДП макрогетерогенных сред коаксиально-волноводным методом.

Результаты работы представлены на двух конференциях: Девятая международная научно-практическая конференция «вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований» и XVI Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов.

Публикации по результатам работы:

1. Спиридонов А.Н. Исследование диэлектрических свойств «живой» древесины на СВЧ. / Т.Д. Кочеткова, К.Ю. Доржиев. // Сборник статей по материалам 9-ой международной научно-практической конференции «вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований». Сибак г. Новосибирск 2018 г.
2. Спиридонов А.Н. Решение задачи распространения радиоволн в лесной растительности. Литературный обзор // XVI Всероссийская конференция СНИИ. Россия, г. Томск, 13 –15 мая 2019 г.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Информация о выполнении государственной инвентаризации лесов в части 1 дистанционного мониторинга использования лесов в 2017 году. Федеральное Агентство Лесного Хозяйства. Документы. URL: <http://data.rosleshoz.ru/+/DOCS/%D0%98%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%BE%20%D0%B2%D1%8B%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B8%20%D0%B3%D0%BE%D1%81%D1%83%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B9%20%D0%B8%D0%BD%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%80%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8%20%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%BE%D0%B2%20%D0%B2%20%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%20%D0%B4%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B0%20%D0%B8%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%BE%D0%B2%20%D0%B2%202017%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D1%83.pdf> (дата обращения: 21.02.2019).
2. Царьгородцев Ю.П. Метод и установка для измерения комплексной ДП составляющих растительности в диапазоне частот 30-300 МГц / Ю.П. Царьгородцев, А.А. Чухланцев, В.И. Кобылянский // Лесной вестник. 2005. С 129-140.
3. Басанов Б.В. Метод определения эффективной диэлектрической проницаемости лесного полога / А. Ю. Ветлужский, В. П. Калашников // Журнал радиоэлектроники № 4, 2010. С. 50-66.
4. Bossou O.V. Dielectric measurements of tropical wood / O.V. Bossou, J.R. Mosig, J.F. Zurcher // Journal of the International Measurement Confederation. 2010. V. 43. No. 3. P. 400-405.
5. Калинкевич А.А. Об измерении диэлектрической проницаемости «живой» древесины дерева в целях микроволнового дистанционного зондирования / А.А. Калинкевич, Б.Г. Кутуза, М.С. Крылова, В.М. Масюк Е.А. Хромец, А.Ю. Каковкина, Л.Р. Lightart // Материалы IV Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» – ИРЭ РАН, 29 ноября -3 декабря 2010. С. 191-195.
6. Wang W. Monitoring electrical properties of thermally modified wood as a possible tool for quality assessment / W. Wang, Y. Zhy, J. Cao, P.D. Kamdem // Holzforschung. 2016. V. 70. No. 4. P. 351-359.
7. Kabir M.F. Dielectric and ultrasonic properties of rubber wood. Effect of moisture content, grain direction and frequency / M.F. Kabir, W.M. Daud, K.B. Khalid, A.H.A. Sidek // Holz als Roh - und Werkstoff. 1998. V. 56. No. 4. P. 223-227
8. Кочеткова Т.Д. Комплексная диэлектрическая проницаемость древесины в терагерцовом диапазоне / Кочеткова Т.Д., Суслияев В.И., Дорожкин К.В. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 8-3. С. 85-87.

9. Tanaka S. Dielectric anisotropy of oven- and air-dried wood evaluated using a free space millimeter wave / S. Tanaka, K. Shiraga, Y. Ogawa, Y. Fujii, S. Okumura, Togo, H. Kukutsu, N. Mochizuki, S. // *Journal of Wood Science*. 2013. V. 59. No. 5. P. 367-374.
10. Reci H. Non-destructive evaluation of moisture content in wood using ground penetrating radar / H. Reci, T. Chinh Mai // *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*. 2016. V. 5. No. 2. P. 575-581.
11. Goreshev M.A. Dielectric Properties of Birch Wood in the High-Frequency Range / M.A. Goreshev, E.S. Litvishko, V.V. Lopatin // *Russian Physics Journal*. 2016. P. 1-4.
12. Романов А.Н. Диэлектрические свойства болотной растительности в диапазоне 0,1–18 ГГц при вариациях температуры, влажности и частоты. / А.Н. Романов, Т.Д. Кочеткова, В.И. Суслиев., А.С. Щеглова // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2017. Т. 60, № 5. С. 52-60.
13. Романов А.Н. Сезонные различия диэлектрических и радиоизлучательных характеристик карликовых пород древесной тундровой растительности в микроволновом диапазоне. / А.Н. Романов, П.Н. Уланов // *Сборник тезисов докладов шестнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса"*, Москва, ИКИ РАН, 2018 г.
14. Jinyang Du, Jiancheng Shi, Saibun Tjuatja, Kun Shan Chen. A Combined Method to Model Microwave Scattering from a Forest Medium // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 4 April 2006.
15. Tamir T., On radio wave propagation in forest environments // *IEEE Tr. AP*. 1967. V. AP-15. No. 6. P. 806-817.
16. Tamir T., Radio wave propagation along mixed paths in forest environments // *IEEE Tr. AP*. 1977. V. AP-25. No. 4. P. 471-477.
17. Li L.W., Yeo T.S., Kooi P.S., Leong M.S. Radio wave propagation along mixed paths through a four – layered model of rain forest: an analytical approach // *IEEE Tr. Antennas and Propagat*. 1998. V. 46. No. 7. P. 1098-1111.
18. Koh J.H., Li L.W., Kooi P.S., Yeo T.S., Leong M.S. Dominant lateral waves in canopy layer of a four – layered forest. // *Radio Sci*. 1999 V. 34. No. 3. 681—691.
19. Малевич Е.С. Моделирование распространения радиоволн над нерегулярной земной поверхностью с лесными массивами с использованием метода параболического уравнения. / Е.С. Малевич, М.С. Михайлов, В.А. Пермяков // *Материалы II Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» г. Муром, 26-27 июня 2018 г. – Муром: Муромский институт (филиал) "Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых"*, 2018. – С. 187–192.
20. Cavalcante G.P.S., Sanches M.A.R., Oliveira R.A.N. Mobile Radio Propagation along Mixed Paths in Forest Environment // *Journal of Microwaves and Optoelectroncs*. 1999 V. 1, No. 4, P. 42-52.

21. Holm P. et al. Wave propagation over a forest edge-parabolic equation modelling vs. measurements // Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002 The 13th IEEE International Symposium on. IEEE. 2002 V. 1 C. 140-145.
22. Holm P. Parabolic equation technique in vegetation and urban environments. / Lundborg B., Waern A. // Report Sweden FOI-R--1050--SE. 2003 C. 28-33
23. Мателенок И.В. Исследование трехмерной структуры растительного покрова ерниковых тундр с применением фотографической съемки и методов автоматизированной обработки изображений. / И.В. Мателенок, В.В. Мелентьев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. с. 100–111
24. Чухланцев А.А. Ослабление электромагнитных волн растительными покровами. / А.А. Чухланцев, А.М. Шутко, С.П. Головачев // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 11. С. 128-131.
25. Ulaby F.T. et al. Michigan microwave canopy scattering model. / F.T. Ulaby, K. Sarabandi, K. McDohald // Int. J. Remote Sensing. 1990. V. 11. No 7. P. 1223-1253.
26. Чухланцев А.А. СВЧ радиометрия растительных покровов // Дисс. на соискание ученой степени д.ф.-м.н., М. 2004.
27. Магазинникова А.Л. Статистические методы расчета УКВ поля в лесных районах. // Дисс. на соискание ученой степени к.ф.-м.н., Томск, 1998.
28. Новик С.Н. Исследование взаимодействия электромагнитного излучения с лесным пологом // Дисс. на соискание ученой степени к.ф.-м.н., Томск, 2007.
29. Атутов Е.Б. Отражающие и ослабляющие свойства лесных сред в метровом диапазоне волн. // Дисс. на соискание ученой степени к.ф.-м.н., Томск, 2009.
30. Гулиева Ф.Э. Новый метод дистанционной оценки суммарной биомассы в частично новопосаженных лесных массивах. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 7 с. 141, 2016.
31. Дюкарев Е.А. Исследование растительного покрова болотных экосистем по спутниковым данным. / Е.А. Дюкарев, М.Н. Алексеева, Е.А. Головацкая // Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, 2017.
32. Родионова Н.В. Сезонные вариации обратного рассеяния от естественных покровов Подмоскovie в сезон 2015–2016 гг. по радарным данным Sentinel 1A. // Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Московская обл., 2017.
33. Комаров В.В. Тестирование моделей теории смесей применительно к расчету диэлектрической проницаемости влажной древесины в СВЧ –диапазоне, 2007.
34. Марчуков В. С. Автоматизированные методы оценки динамики пространственного распределения растительного покрова и грунтов по данным дистанционного мониторинга. // Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, 2010.
35. Epov M.I. Dielectric spectroscopy of oil-bearing rocks at 0.05–16 GHz / Epov M.I., Mironov V.L., Bobrov P.P., Savin I.V., Repin A.V. // Russian Geology and Geophysics. 2009. C. 470-474.

36. Милкин С.С. Об автоматизации экспериментальных исследований взаимодействия электромагнитных волн с гетерогенными жидкими средами на сверхвысоких частотах / Милкин С.С., Стародубов А.В., Вениг С.Б. // Журнал технической физики. 2014. Т. 84, вып. 1. С. 1-6.
37. Анализатор логических цепей. Режим доступа: <http://temir-pribor.ru/catalog/analizatory-logicheskikh-tsepey/analizator-tsepey-agilent-e8357a/>. (Дата обращения: 11.10.2018).
38. Кочеткова Т.Д. Диэлектрическая проницаемость хвойных пород древесины в диапазоне частот 3–12 ГГц /Т.Д. Кочеткова, В. И. Сусяев, С. И. Волчков // Вестник СибГАУ. 2013.— № 5 (51). С.101-104.
39. Дикая И.В. Технология металлов и материалов. // Армавир: РИО АГПУ, 2012. – с. 46

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

СТО ТГУ XXX – 2021

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

**Методика измерений эффективных значений относительной
диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь
дисперсных и сыпучих материалов в диапазоне сверхвысоких частот**

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Томск – 2021

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН И ВНЕСЕН Центром коллективного пользования «Центр радиофизических измерений, диагностики и исследования параметров природных и искусственных материалов» (ЦКП РИ), Отделом стандартизации, метрологии и контроля качества НИР и ОКР Научного управления Томского государственного университета (ОСМ и КК НИР и ОКР НУ ТГУ)

2 ПРИНЯТ И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом ректора ТГУ от дд.мм.гггг № XXX

3 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

ИСПОЛНИТЕЛИ

Руководитель начальник НУ

Исполнители: Суляев В.И. канд. физ.-мат. наук, директор ЦКП РИ

Коровин Е.Ю. инженер ОКД ЦКП

Кочеткова Т.Д. канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры
радиоэлектроники

Спиридонов А.Н. цифровой ассистент

Соколенко Е.Н. нач. ОСМ и КК НИР и ОКР НУ

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

Методика измерений эффективных значений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь дисперсных и сыпучих материалов в диапазоне сверхвысоких частот

Дата введения гтгг – мм – дд

Общие положения

Настоящий стандарт организации СТО ТГУ XXX-2021 распространяется на «Методику измерений эффективных значений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь дисперсных и сыпучих материалов в диапазоне сверхвысоких частот» (далее по тексту методика).

В настоящем стандарте СТО ТГУ XXX-2021 «сторонними организациями» именуются другие вузы, академические институты и НИИ, организации и предприятия реального сектора экономики.

Стандарт организации предназначен для применения в лабораториях «Центра радиофизических измерений, диагностики и исследования параметров природных и искусственных материалов» ТГУ и может быть предложен для использования в аналогичных лабораториях сторонних организаций.

1 Область применения

Коаксиально-волноводный метод основан на использовании отрезка воздушной коаксиальной линии. Образец размещается внутри закрытой части линии передачи. Электрофизические характеристики, в частности, диэлектрическая проницаемость, вычисляются из результатов измерений модуля и фазы отраженного сигнала (S_{11}) или прошедшего сигнала (S_{21}). Данный метод является широкополосным, нижнее значение ограничено практической длиной образца, есть возможность измерения анизотропных материалов в волноводе. Применяются допущения свойств материала для измерений: однородность, гладкая и плоская поверхность, отсутствие воздушных зазоров на стенках устройства подключения, образец полностью заполняет устройство подключения.

Метод предназначен для измерений в диапазоне частот 10 МГц - 18 МГц образцов сыпучих и дисперсных материалов с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ от 1,0 до 200 и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ от $5 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-2}$. Достоинством метода является широкий диапазон измеряемых значений $\text{tg}\delta$ и отсутствие перемещаемых

частей, соответствие структуры электромагнитного поля в коаксиальной линии и в свободном пространстве.

2 Нормативные ссылки

В настоящей методике использованы ссылки на следующие стандарты и нормативные документы:

ГОСТ Р 8.563–96 ГСИ Методики выполнения измерений.

ГОСТ Р ИСО 5725–2–2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости стандартного метода измерений.

РМГ 29–99 ГСИ Метрология. Основные термины и определения.

РМГ 43–2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Применение «Руководства по выражению неопределённости измерений».

РМГ 52–2002 ГСИ Общие методические рекомендации по применению положений ГОСТ 8.315–97 при разработке и применении стандартных образцов.

СТО ТГУ 002–2006 Положение о порядке разработки, оформления и утверждения стандартов организации.

ГОСТ 25336-82 Посуда и оборудование лабораторные стеклянные. Типы, основные параметры и размеры.

ГОСТ 31828-2012 Аппараты и установки сушильные и выпарные. Требования безопасности. Методы испытаний.

ГОСТ 28268-89 Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений.

П р и м е ч а н и е – При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования – на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодно издаваемому указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по соответствующим ежемесячно издаваемым информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный стандарт заменен (изменен), то при пользовании настоящим стандартом следует руководствоваться заменяющим (измененным) стандартом. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применяются следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 Методика выполнения измерений (МВИ): Совокупность операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленной погрешностью (неопределенностью).

3.2 Макрогетерогенная среда: Образец вещества (материала), состоящий из частиц размером более 10^{-5} м, но не более 2 мм или измельченный до таких размеров.

3.3 Расширенная неопределенность (U): Величина, определяющая интервал вокруг результата измерений, в пределах которого, как можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могли бы быть приписаны измеряемой величине.

4 Сущность методики измерения

Определение относительной диэлектрической проницаемости ϵ основано на измерении модуля, а определение тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ – на измерении фазы отраженного сигнала (S_{11}) или прошедшего сигнала (S_{21}) до и после размещения в нем образца диэлектрика.

5 Средства измерения, вспомогательное оборудование, реактивы

При выполнении измерений применяют следующие средства измерений и другие технические средства:

5.1 Измерительные ячейки, которые представляют собой отрезок коаксиальной линии с двумя шайбами из фторопласта внутри. Шайбы предназначены для удержания образца в ячейке. Одна шайба зафиксирована на центральном проводнике, вторая шайба съёмная. Измерительная ячейка показана на рисунке А.1.

Диаметр внутреннего проводника составляет 3,04 мм, внешнего – 7 мм. Длина ячеек варьируется в диапазоне 17–57 см. Передающие линии сечением 7/3,04 мм имеют единственный распространяющийся тип волны ТЕМ при воздушном заполнении вплоть до 18 ГГц. При заполнении измерительной ячейки диэлектриком с $\epsilon' > 1$ появляется возможность распространения высших типов волн (в первую очередь H_{11}) на частотах ниже 18 ГГц.

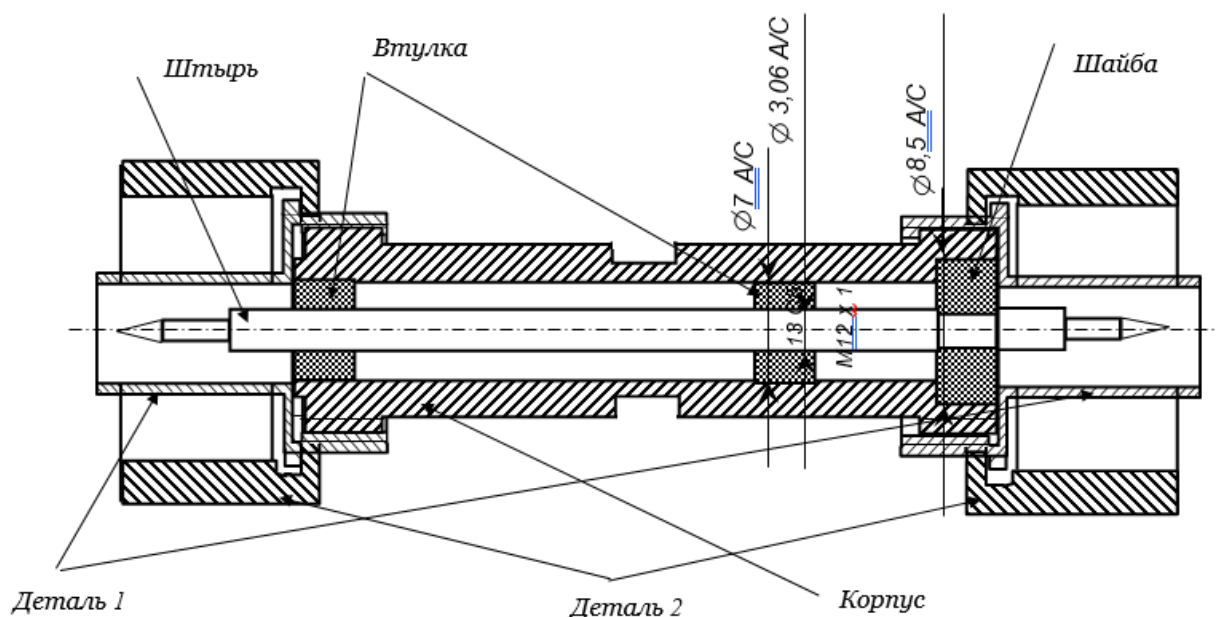


Рисунок А.1 – Измерительная ячейка

Во избежание поглощения всей электромагнитной энергии влажным образцом следует выбирать длину ячейки в зависимости от предполагаемой влажности образца.

Размеры ячеек для образцов разной влажности выбирают в соответствии с таблицей 1.

Таблица А.1- Рекомендуемые размеры ячеек

Длина, мм	Влажность, г/г
17	0,30 и выше
37	0,11 – 0,29
57	0,00 – 0,10

5.2 Векторный анализатор цепей PNA E8363B фирмы Agilent Technologies (Государственный реестр № 32042-07) либо аналогичный.

5.3 Весы лабораторные 2-го класса точности по ГОСТ 24104.

5.4 Спирт этиловый ректифицированный из пищевого сырья. Технические условия. ГОСТ Р 51652-2000.

5.5 Ключи, тарированные на усилие 1,27 Н/м². На 10 мм и 12 мм.

5.6 Кабель СВЧ с защитой 40 ГГц, тип 2,4 мм (вилка) – тип 2,4 мм (вилка), 3000 мм. КСА40А-0,5-0,5-3000.

5.7 Пуансон (рисунок А. 2).

5.8 Сушильный шкаф ШСВЛ-80.

5.9 Стаканчики для взвешивания образцов типа СВ по ГОСТ 25336-82.

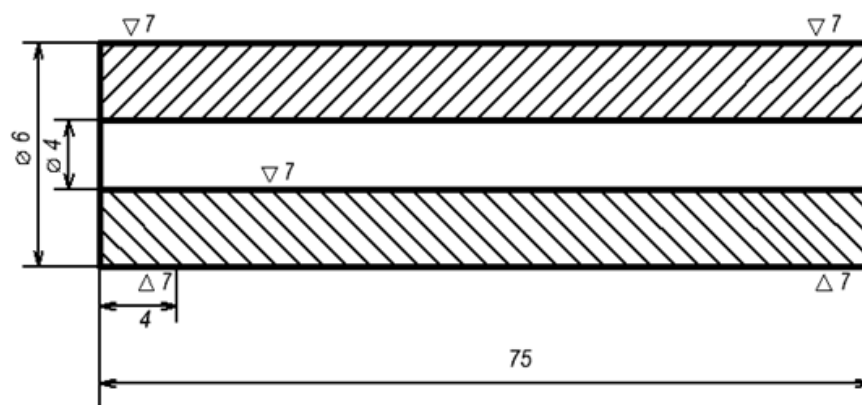


Рисунок А.2 – Пуансон

6 Условия выполнения измерений

При выполнении измерений соблюдают следующие условия:

Относительная влажность воздуха от 20 % до 60 %.

Коаксиально-волноводный метод допускает изменение температурной зависимости диэлектрической проницаемости материалов. Пределы изменения температуры определяются температурным диапазоном подключаемых кабелей и возможностями используемой камеры тепла и холода.

7 Подготовка образцов

Подготовка образцов насыпной плотности

Для измерения комплексной диэлектрической проницаемости в коаксиальной линии передачи необходимо измельчить материал до размеров твердых частиц не более 2 мм. Малые размеры образцов обусловлены необходимостью плотного заполнения измерительной ячейки для уменьшения погрешностей измерений.

Мягкие или пластичные образцы не требуют измельчения.

Примечание - В данном случае измеряют эффективную комплексную диэлектрическую проницаемость композиционной смеси материала и воздуха, либо материала и жидкости, выделяющейся из материала при уплотнении.

8 Выполнение измерений

При выполнении измерений выполняют следующие измерения:

- приборы подготавливают к работе в соответствии с инструкцией по эксплуатации;
- анализатор цепей калибруют с помощью электронного калибратора в выбранном диапазоне частот;
- взвешивают пустую коаксиальную ячейку;
- анализатор цепей подключают к пустой измерительной ячейке с установленной в ней фторопластовой шайбой, зафиксированной на внутреннем проводнике. Отмечают с какой стороны расположена фиксированная шайба. Схема подключения представлена на рисунке А.3;
- измеряют элементы матрицы рассеяния;
- образец засыпают в коаксиальную ячейку мелкими порциями и каждый раз уплотняют с помощью пуансона до заполнения, оставляя 4 мм длины для съёмной шайбы. Внешняя торцевая поверхность шайбы должна быть в одной плоскости с торцевой поверхностью ячейки без выступов и углублений;
- взвешивают коаксиальную ячейку, наполненную образцом;
- анализатор цепей подключают к заполненной измерительной ячейке, располагая её так же, как при измерении ячейки без образца;
- измеряют элементы матрицы рассеяния;
- взвешивают емкость для сушки и хранения образца;
- извлекают из ячейки образец с помощью пуансона в подготовленную емкость;
- взвешивают емкость с образцом;
- очищают коаксиальную ячейку от посторонних частиц бязью, смоченной спиртом-ректификатом, и высушивают естественным путем.

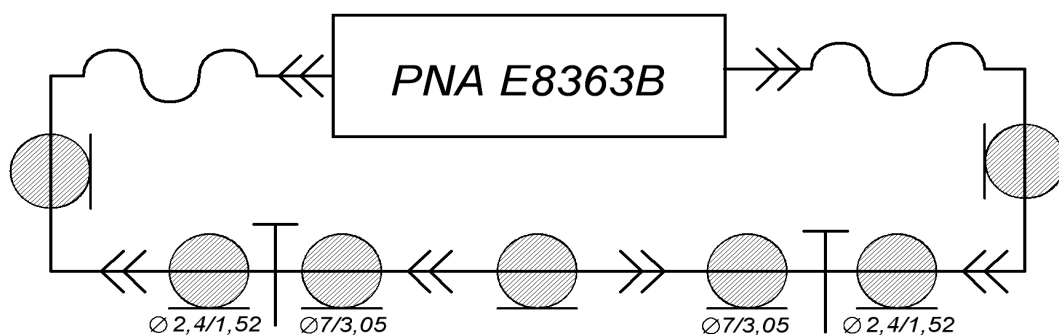


Рисунок А.3 – Функциональная схема установки

9 Обработка результатов измерений

Элементы матрицы рассеяния зависят от диэлектрической проницаемости образца по сложному нелинейному закону. Эта зависимость определяется по теории Л.М. Бреховских

распространения волн в слоистых средах. Схема измерительной ячейки изображена на рисунке А.4.

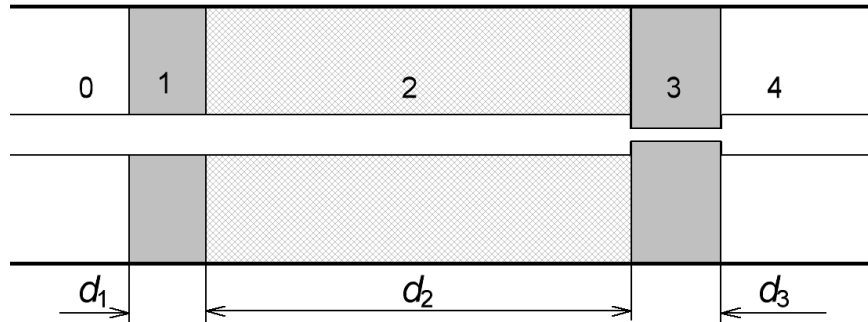


Рисунок А.4 – Схема измерительной коаксиальной ячейки

$Z_{\text{вх}}$ – входное волновое сопротивление слоя, Z – волновое сопротивление слоя, d – толщина слоя; 0, 4 – воздушная среда, 1, 3 – шайба из слабопоглощающего материала (фторопласт), 2 – исследуемое вещество. Эти параметры рассчитываются по формулам (А.1) и (А.2):

$$S_{11} = \frac{Z_{\text{вх}1} - Z_0}{Z_{\text{вх}1} + Z_0}, \quad (\text{А.1})$$

$$\frac{1}{S_{12}} = \prod_{i=0}^{i=3} \frac{Z_i + Z_{\text{вх}(i+1)}}{Z_{(i+1)} + Z_{\text{вх}(i+1)}} e^{-jk_i d_i}, \quad (\text{А.2})$$

где $Z_{\text{вх}1} = \frac{Z_{\text{вх}2} + Z_1 \text{th}(jk_1 d_1)}{Z_1 + Z_{\text{вх}1} \text{th}(jk_1 d_1)} Z_1$ – комплексный входной импеданс структуры, расположенной справа от границы между средами 0 и 1. Импедансы $Z_{\text{вх}2}$ и $Z_{\text{вх}3}$ вычисляются по аналогичным формуле (А.3):

$$Z_{\text{вх}i} = \frac{Z_{\text{вх}(i+1)} + Z_i \text{th}(jk_i d_i)}{Z_1 + Z_{\text{вх}(i+1)} \text{th}(jk_i d_i)} Z_1, \quad (\text{А.3})$$

в которой индекс слоя $I = 2, 3$, $Z_{\text{вх}4} = Z_4 = Z_0$,

$Z_i = Z_0 / \sqrt{\varepsilon_i}$ (Z_0 – волновое сопротивление линии); j – мнимая единица;

$k_i = k_0 \sqrt{\varepsilon_i}$ – комплексное волновое число i -го слоя, где $\varepsilon_i = \varepsilon' - j\varepsilon''$ – комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) i -го слоя; $k_0 = 2\pi f/c$ – волновое число в вакууме (c – скорость света); d_i – толщина i -го слоя, кроме $d_0 = 0$.

Приравняв выражение (A.1) к S11 или выражение (A.2) к S12, получают нелинейное уравнение относительно комплексной диэлектрической проницаемости. Уравнение решают методом минимизации целевой функции – разницей измеренного и рассчитанного значений.

Для определения влажности емкость с образцом высушивают в сушильном шкафу до постоянства массы.

Влажность образца в процентах высчитывают по формуле:

$$W(\%) = \frac{m - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}}} * 100\%, \quad (\text{A.4})$$

где m – масса влажного образца; $m_{\text{сух}}$ – масса образца в абсолютно сухом состоянии.

10 Требования к неопределенности измерений

Расширенная неопределенность (предел допускаемой относительной погрешности) измерений при использовании метода объёмного резонатора, с уровнем доверия 0,95 в соответствии с РМГ 43, составляет:

- $\pm 1 \%$ для ε от 1,5 до 5;
- $\pm 2 \%$ для ε от 5 до 20;
- $\pm 3 \%$ для более 20;
- $\pm (15 + (3 \cdot 10^{-3} / \text{tg} \delta)) \%$ для $\text{tg} \delta$.

11 Оформление результатов

В дополнение к обработке результатов измерений по требованиям п.9 и п.10 в рабочем журнале оформляется запись, включающая сведения об измеряемом образце, условиях измерений и дате получения результата измерений.

Запись в журнале удостоверяет лицо, проводившее измерения.

Результаты измерений и результаты анализа, полученные по требованиям настоящей методики, заносят в журнал.

Журнал должен быть зарегистрирован (учтен) в установленном в организации (предприятии) порядке.

Результаты измерений и результаты анализа служат основанием для оформления протокола выполнения измерения.

12 Требования к квалификации персонала

К выполнению работ допускаются лица, имеющие квалификацию инженера или научного сотрудника, сдавшие квалификационный экзамен и получившие допуск к работе на векторном анализаторе цепей «E 8363 B» фирмы Agilent Technologies и освоившие методику выполнения измерений.

13 Требования безопасности

При работе на векторном анализаторе цепей «E 8363 B», и другом вспомогательном оборудовании следует соблюдать следующие требования безопасности:

12.1 При эксплуатации электроприборов в процессе выполнения измерений необходимо соблюдать требования электробезопасности в соответствии с ГОСТ 12.1.019 и ГОСТ 12.1.18.

12.2 Требованиям инструкции по эксплуатации приборов в соответствии с «Руководством по эксплуатации»

12.3 Помещение лаборатории должно соответствовать требованиям пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004

Руководитель

Начальник Научного управления

д-р физ.- мат. наук, проф.

Отв.исполнитель

Инж. ЦПК РИ

_____ Т.Д. Кочеткова

Нормоконтролер

_____ Е.Н.Соколенко

СОГЛАСОВАНО

Нач. ОСМ и КК НИОКР НУ

_____ Е.Н.Соколенко

Нач. ПУ

_____ И.А.Котляр

Отчет о проверке на заимствования №1



Автор: Спиридонов Алексей fernando_alexey1998_torres@mail.ru / ID: 8176171

Проверяющий: Спиридонов Алексей (fernando_alexey1998_torres@mail.ru / ID: 8176171)

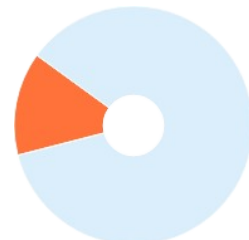
Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат» - <http://users.antiplagiat.ru>

ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 2
Начало загрузки: 25.01.2021 13:35:49
Длительность загрузки: 00:00:03
Имя исходного файла: ВКР Спиридонов.pdf
Название документа: ВКР Спиридонов
Размер текста: 1 кБ
Символов в тексте: 96480
Слов в тексте: 11393
Число предложений: 936

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Последний готовый отчет (ред.)
Начало проверки: 25.01.2021 13:35:53
Длительность проверки: 00:00:07
Комментарии: не указано
Модули поиска:



ЗАИМСТВОВАНИЯ

14%

САМОЦИТИРОВАНИЯ

0%

ЦИТИРОВАНИЯ

0%

ОРИГИНАЛЬНОСТЬ

86%

Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.

Самоцитирования — доля фрагментов текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника, автором или соавтором которого является автор проверяемого документа, по отношению к общему объему документа.

Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.

Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.

Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.

Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым шла проверка, по отношению к общему объему документа.

Заимствования, самоцитирования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.

Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Источник	Ссылка	Актуален на	Модуль поиска
[01]	3,09%	http://www.sozvezdie.su/uploads/files/files/ttr/ttr_2016_2.pdf	http://sozvezdie.su	29 Июл 2017	Модуль поиска Интернет
[02]	1,75%	опубликована в журнале	http://tsu.ru	16 Янв 2018	Модуль поиска Интернет
[03]	1,08%	Строение древесины и ее свойства	https://revolution.allbest.ru	18 Июн 2019	Модуль поиска Интернет
[04]	0,7%	ГОСТ Р 8.623-2006: Государственная система обеспечения единства измерений. От...	http://standartgost.ru	01 Мая 2017	Модуль поиска Интернет
[05]	1,44%	Статистические методы расчета УКВ полей в лесных районах - скачать бесплатно ...	http://fizmathim.com	18 Мая 2016	Модуль поиска Интернет
[06]	1,06%	1	http://mpei.ru	23 Ноя 2017	Модуль поиска Интернет
[07]	0,03%	Р 50.2.058-2007 ГСИ. Оценивание неопределенностей аттестованных значений ста...	http://gosthelp.ru	19 Дек 2018	Модуль поиска Интернет
[08]	0,38%	Конспект лекций по дисциплине «Древесиноведение» - Сторінка 6	http://ua.convdocs.org	05 Июл 2016	Модуль поиска Интернет
[09]	0,97%	СТО ТГУ 160-2017 Метрологическое обеспечение. Порядок проведения поверки и ...	http://tsu.ru	16 Дек 2018	Модуль поиска Интернет
[10]	0,64%	Электрические свойства древесины	http://studopedia.net	24 Фев 2016	Модуль поиска Интернет
[11]	0,82%	http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vital:7849/SOURCE01	http://vital.lib.tsu.ru	07 Сен 2020	Модуль поиска Интернет
[12]	0,59%	https://vestnik.sibsau.ru/vestnik/1880/(2/2)	https://vestnik.sibsau.ru	16 Мар 2018	Модуль поиска Интернет
[13]	0%	МР 18.1.04-2005 - Методические рекомендации. Система контроля качества резуль...	http://snipov.net	15 Июн 2019	Модуль поиска Интернет
[14]	0%	1	http://mpei.ru	12 Фев 2018	Модуль поиска Интернет
[15]	0,34%	2	http://mpei.ru	23 Ноя 2017	Модуль поиска Интернет
[16]	0,48%	МР 18.1.04-2005: Методические рекомендации. Система контроля качества резуль...	http://standartgost.ru	01 Мая 2017	Модуль поиска Интернет
[17]	0%	МР 18.1.04-2005 Методические рекомендации. Система контроля качества резуль...	https://files.stroyinf.ru	08 Апр 2019	Модуль поиска Интернет
[18]	0,32%	Электрические свойства	http://sdamzavas.net	02 Янв 2017	Модуль поиска Интернет
[19]	0%	Особенности древесины разных пород	https://lektcii.com	28 Мар 2019	Модуль поиска Интернет

