

УДК 577.35:574.24

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-70-85

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ ПО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТКАНЕЙ СТВОЛА

В.Г. Суховольский¹, *д-р биол. наук, проф.*; *ResearcherID: K-1740-2018*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0407-2290>

В.И. Воронин², *д-р биол. наук*; *ResearcherID: N-8292-2013*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1467-9865>

В.А. Осколков², *канд. биол. наук*; *ResearcherID: K-1961-2018*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4339-1094>

А.В. Ковалев³, *канд. техн. наук*; *ResearcherID: K-1756-2018*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9744-768X>

¹Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Академгородок, д. 50/28, г. Красноярск, Россия, 660036; e-mail: soukhovolsky@yandex.ru

²Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, ул. Лермонтова, д. 132, г. Иркутск, Россия, 664033; e-mail: bioin@sifibr.irk.ru, vosk@sifibr.isk.ru

³Красноярский научный центр СО РАН, Академгородок, д. 50, г. Красноярск, Россия, 660036; e-mail: sunhi.prime@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены возможности использования методов диэлектрической спектроскопии для оценки состояния деревьев. Диэлектрические показатели характеризуют клеточные мембраны и проводимость растительных тканей. Для измерения диэлектрических показателей использован диэлектрический импульсный Фурье-спектрометр оригинальной конструкции, подключенный к портативному компьютеру, с помощью которого осуществляется управление и питание прибора. Его конструкция позволяет экспрессно (за время около 1 с) получить информацию о диэлектрических характеристиках тканей ствола дерева в диапазоне частот от 1 до 100 кГц и в полевых условиях обработать, визуализировать и сохранить результаты измерений на компьютере. Оценки состояния деревьев, полученные с помощью диэлектрического импульсного Фурье-спектрометра, сопоставлялись с визуальными характеристиками дерева и данными о его радиальном приросте. Показано, что существуют различия в значениях диэлектрических характеристик у деревьев разных категорий состояния и с разными величинами радиального прироста. Данные диэлектрической спектроскопии в отличие от субъективных качественных визуальных показателей состояния дерева носят количественный объективный характер. Их можно получить значительно быстрее и с меньшими трудозатратами по сравнению с оценками характеристик дерева по радиальному приросту. Предложенный метод использовался для оценки состояния кедр сибирского (*Pinus sibirica*), пихты сибирской (*Abies sibirica*) и ели обыкновенной (*Picea obovata*) в лесных насаждениях Прибайкалья. Исследования проводились как в контрольных (неповрежденных) насаждениях, так и в пораженных бактериальной водяжкой. Показано, что предложенный метод может быть применен для экспресс-оценки состояния деревьев и уровня их повреждений.

Для цитирования: Суховольский В.Г., Воронин В.И., Осколков В.А., Ковалев А.В. Экспресс-оценка физиологического состояния древесных растений по диэлектрическим характеристикам тканей ствола // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 70–85. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-70-85

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-29-05074офи_м).

Ключевые слова: состояние дерева, визуальная оценка, радиальный прирост, диэлектрические характеристики, экспресс-измерения.

Введение

Существуют различные методы определения состояния дерева: визуальная классификация по категориям состояния, оценка по характеристикам радиального прироста, измерения физиологических характеристик дерева. Однако эти методы обладают существенными недостатками: визуальные классификации во многом субъективны и дают лишь качественную оценку состояния дерева, использование характеристик радиального прироста трудоемко и неэффективно с точки зрения затрат времени, то же относится к физиологическим показателям. В связи с этим можно говорить о существовании необходимости разработки методов экспрессной количественной оценки состояния деревьев в лесу.

В настоящей работе для экспресс-оценки состояния деревьев использовались методы диэлектрической спектроскопии [9, 12, 13, 32–38, 41–44], на основе которых показатели состояния древесных растений сопоставлялись с визуальными оценками состояния деревьев и величинами их радиального прироста.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в зоне Хамар-Дабанской гольцово-горно-таежной провинции Южно-сибирской горно-таежной области и Байкальской озерно-котловинной провинции Байкало-Джугджурской гольцово-горно-таежной области [1]. Эдификаторами лесов в районе выступают кедр сибирский (*Pinus sibirica*), пихта сибирская (*Abies sibirica*) и ель сибирская (*Picea obovata*) при участии сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica*).

Неблагополучное состояние темнохвойных лесов Прибайкалья (наблюдается уже 40 лет [2–4, 14, 21]) связывали с воздействием поллютантов, массовыми грибными эпифитотиями и размножением насекомых-дендрофагов [21]. В последние годы ситуация еще более усложнилась в связи с распространением в районах Прибайкалья больших очагов бактериозов хвойных [2, 4]. Бактериальная водянка хвойных пород, поражающая в том числе и кедр, представляет собой ранее несвойственное для деревьев Сибири заболевание. Впервые гибель лесов, предположительно от этой болезни, отмечена в 2012 г. на стыке трех районов, в Усольском, Слюдянском и Шелеховском лесничествах Иркутской области, относящихся к Байкальской природной территории. Симптомы бактериальной водянки хвойных – ослабление и усыхание деревьев; поперечные и продольные трещины в коре и активное смолотечение из них; наличие на поперечном срезе древесины ствола «мокрого ядра», а у сильно ослабленных и недавно усохших деревьев – характерного «темного водослоя». Очень часто первым внешне заметным признаком болезни дерева является изменение окраски хвои. Вначале она желтеет, обычно с кончиков, а затем довольно быстро приобретает оранжево- или розовато-красную окраску, засыхает, но сразу, как правило, не осыпается. Это может произойти в любой части

кроны – на вершине, сбоку, снизу, в середине, нередко на отдельной ветви и даже на отдельных мутовках, а в некоторых случаях только на концах ветвей, но иногда и по всей кроне сразу.

Считается, что фактором, приводящим к заражению насаждений инфекцией, стало их общее ослабление, вызванное добычей кедрового ореха методом околота. Обработанные таким способом кедровые деревья находятся в угнетенном состоянии, на их стволах образуются незаживающие язвы, через которые проникает патоген. Для деревьев, подвергавшихся такому воздействию в течение многих лет, характерны повреждения практически по всему стволу.

Для сравнения состояния деревьев, поврежденных водянкой, и деревьев в неповрежденном древостое исследования проводили на 3 пробных площадях (ПП). Контрольная ПП Выдринная (N51°28'16,1", E104°51'21,6") представляет собой кедрово-березово-зеленомошный с породным составом 10К+П,Б, средний диаметр кедрового дерева в насаждении – 27,0 см. Поврежденное насаждение на ПП Бабушкин (N51°29'53,1", E105°59'09,5") – кедрово-березово-зеленомошный с породным составом 9К1П, средний диаметр кедрового дерева в насаждении – 20,5 см. Поврежденное насаждение на ПП Култук (N51°46'06,6", E103°37'16,6") – смешанное лиственнично-кедрово-пихтовое насаждение багульниково-зеленомошного типа с преобладанием в составе древостоя лиственницы, породный состав – 9Л1К+Б, в подросте – кедр, средний диаметр кедрового дерева в насаждении – 16,5 см.

Диэлектрические характеристики тканей стволов деревьев. Диэлектрические параметры тканей (сопротивление и емкость в широком диапазоне частот) позволяют характеризовать емкость мембран клеток и проводимость тканей [8, 25, 33, 41].

Для описания диэлектрических свойств биологических тканей используется эквивалентная электрическая схема ткани, приведенная на рис. 1.

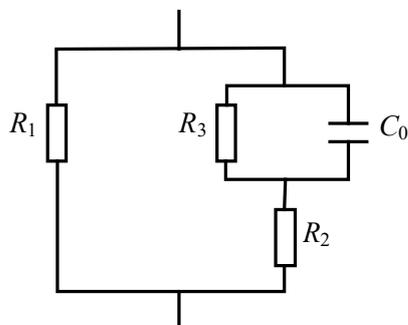


Рис. 1. Микроскопические электрические показатели эквивалентной электрической схемы ткани: R_1 – сопротивление межклеточников; R_2 – сопротивление цитоплазмы; R_3 – сопротивление мембран; C_0 – емкость мембран

Fig. 1. Equivalent electrical scheme of biological tissue. The microscopic electrical indicators: R_1 – intercellular resistance; R_2 – cytoplasm resistance; R_3 – membrane resistance; C_0 – membrane capacity

Как следует из рис. 1., при прохождении электрического тока его часть течет через межклеточную среду, которую можно представлять в виде некоторого сопротивления R_1 (или проводимости $G_1 = 1/R_1$). Часть тока течет через мембраны клеток с сопротивлением R_3 (или проводимостью $G_3 = 1/R_3$) и емкостью C_0 , а далее – через цитоплазму, имеющую сопротивление R_2 (или проводимость $G_2 = 1/R_2$).

По эквивалентной схеме можно из микроскопических электрических показателей рассчитать измеряемые в эксперименте проводимость G и емкость C ткани:

$$G(\omega) = G_1 + \frac{G_2(G_3G_2 + G_3^2 + \omega^2C_0^2)}{(G_2 + G_3)^2 + \omega^2C_0^2}; \quad (1)$$

$$C(\omega) = \frac{C_0G_2^2}{(G_2 + G_3)^2 + \omega^2C_0^2}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$; f – частота пропускаемого тока.

Полный импеданс ткани запишем в следующем виде:

$$Z = \frac{1}{A} = \frac{1}{G(\omega) + i\omega C(\omega)}, \quad (3)$$

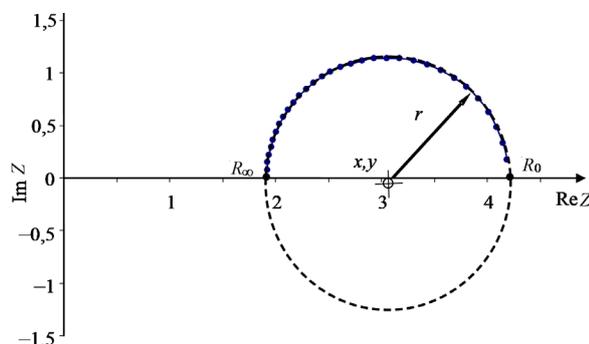
где $A = G(\omega) + i\omega C(\omega)$ – адмиттанс; $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Зависимость электрических характеристик от частоты пропускаемого электрического тока характеризуется импеданс-годографами, представляющими собой кривые, описывающие связь омической и емкостной проводимости на различных частотах. Возможно построение импеданс-годографов в плоскостях полной $\{G, G''\}$ (где $G'' = \omega C$) и диэлектрической $\{C, C''\}$ (где $C'' = (G - G_0)/\omega$) проводимости. Точки пересечения импеданс-годографов с осями G и C дают в этом случае искомые характеристики C_0 и G_∞ .

Для однородного по своим электрическим характеристикам вещества кривая импеданс-годографа представляет полуокружность (диаграмму Дебая), построенную в плоскости вещественной $\text{Re}(\omega)$ и мнимой $\text{Im}(\omega)$ компонент импеданса (рис. 2).

Рис. 2. Кривая импеданс-годографа древесных тканей

Fig. 2. Impedance hodograph of woody tissues



Кривую импеданс-годографа можно описать, используя параметры r_0 и $2r$ (разность между R_0 и R_∞).

При патологических процессах в тканях растений характеристики емкостной и омической составляющих импеданса изменяются. В частности, уменьшается емкость клеточных мембран, изменяется проводимость тканей [24]. В связи с этим рассмотрена возможность использования этих показателей для оценки в полевых условиях состояния тканей древесных растений.

В работах, посвященных изучению диэлектрических характеристик тканей растений, измерялась лишь действительная составляющая импеданса тканей на одной-двух частотах или даже на постоянном токе [5–7, 10, 11, 15–18, 20, 22, 27, 30, 36, 38]. При подобных методах измерений невозможно иметь сколько-нибудь значительную информацию о диэлектрических свойствах тканей и сопоставлять экспериментальные данные с теоретическими представлениями о диэлектрических характеристиках веществ.

Полную характеристику диэлектрических свойств биологической ткани можно получать, проводя измерения действительной и мнимой составляющих импеданса в широком диапазоне частот (в области от 1,0 кГц до 0,5 мГц).

Для полной оценки импеданса обычно используют мосты переменного тока [24, 29, 31], однако эти методы достаточно медленны и трудоемки. Для быстрого измерения полных диэлектрических свойств биологического материала в широком диапазоне частот и автоматической обработки полученных данных нами использован метод диэлектрической Фурье-спектроскопии [26], который состоит в том, что на измеряемый объект (растительную ткань) подается достаточно «богатый» сигнал воздействия (например, сигнал, состоящий из большого числа синусоид) и регистрируется функция отклика объекта $A(t)$ в плоскости «амплитуда отклика – время». Далее, проводя Фурье-преобразование функции $A(t)$, можно получить спектральную функцию $A(\omega)$.

В качестве подходящего сигнала, возбуждающего систему, нами использовалась импульсная функция $X(t)$:

$$X(t) = \begin{cases} H, 0 \leq t \leq T, \\ 0, t > T, \end{cases}$$

где H – амплитуда возбуждающего сигнала; T – продолжительность возбуждения.

Использование методов Фурье-спектроскопии дает, во-первых, значительный выигрыш во времени, требуемом для измерения, т. к. фактически одновременно производятся измерения на всех частотах, и, во-вторых, позволяет добиться полной автоматизации измерений, т. к. значения функции отклика системы $A(t)$ могут задаваться специальной программой, загруженной в управляющий компьютер, с помощью которого будут производиться Фурье-преобразование и вычисляться параметры импеданс-годографов.

Для массовых экспрессных оценок состояния отдельных деревьев с автоматической обработкой результатов измерений и сохранением данных на компьютере нами разработан полевой прибор – диэлектрический спектрометр. Конструктивно он состоит из трех блоков, соединенных сигнальными проводами (рис. 3).

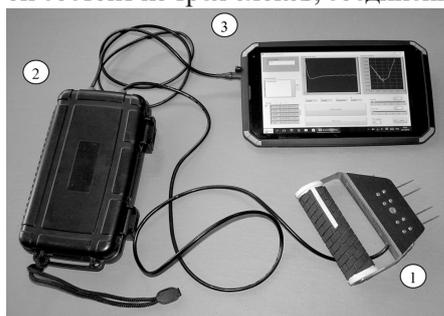


Рис. 3. Общий вид полевого диэлектрического спектрометра для измерения, обработки и хранения данных, визуализации результатов: 1 – измерительный щуп; 2 – плата спектрометра; 3 – планшетный персональный компьютер

Fig. 3. General view of a field dielectric spectrometer for measuring, processing and storing data, visualizing the results: 1 – measuring probe; 2 – spectrometer board; 3 – tablet personal computer

Схема измерения включает: генерацию узкого прямоугольного импульса; преобразование его в аналоговый вид; подачу электрического импульса на исследуемый образец; регистрацию ответного аналогового сигнала; перевод полученного сигнала в цифровой формат; Фурье-преобразование полученного сигнала; построение импеданс-годографа; расчет и сохранение параметров импеданс-годографа (рис. 4).

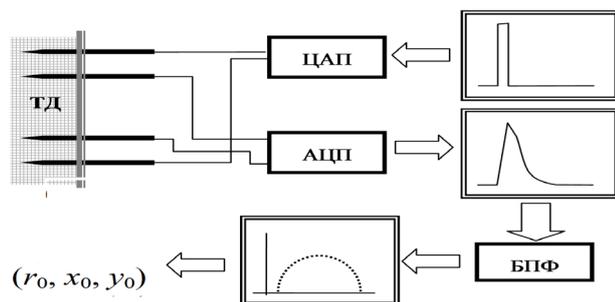


Рис. 4. Блок-схема оригинального автоматизированного диэлектрического импульсного Фурье-спектрометра для экспрессных измерений диэлектрических свойств древесных тканей, автоматической обработки и хранения данных: ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БПФ – быстрое преобразование Фурье

Fig. 4. Block diagram of the original automated pulsed Fourier transform dielectric spectrometer for express measurements of dielectric characteristics of woody tissues, automatic processing and storage of data: ЦАП – digital-to-analog converter (DAC); АЦП – analog-to-digital converter (ADC); БПФ – fast Fourier transform (FFT)

Для управления измерениями в полевых условиях используется влагозащищенный планшетный компьютер. Аналогово-цифровые преобразования производятся с помощью подключенной к компьютеру платы спектрометра. Непосредственно на объект электрические импульсы подаются через измерительный щуп. Результаты каждой операции выводятся на экран и сохраняются в компьютере в виде 2 текстовых файлов.

Процесс измерения (включая воздействие на объект – древесную ткань, обработку сигнала отклика и сохранение данных) длится менее 1 с. Для расчетов использовалась оригинальная встроенная функция пакета LabView 8.2. Основные затраты времени в процессе измерения характеристик деревьев в насаждении связаны с переходом оператора от дерева к дереву.

Оценка состояния дерева по визуальным признакам. Оценка состояния дерева проводилась с помощью стандартной визуальной шкалы категорий состояния [19]. Все обследованные деревья на ПП классифицировались с помощью шкалы, приведенной в табл. 1.

Дендрохронологические исследования. Дендрохронологические исследования проводились по общепринятой методике [39]. Был осуществлен отбор буровых образцов кедра (общее число кернов – 67). По этим образцам древесины после измерения ширины годичных колец с применением автоматизированной системы LINTAB [40] были построены индивидуальные древесно-кольцевые хронологии, которые датировались методом cross-dating в программном пакете TSAP [40]. В процессе перекрестной датировки устанавливался точный календарный год каждого годичного кольца дерева. Для определения даты возможного начала повреждений каждого исследованного дерева на ПП оценивались средний прирост и стандартное отклонение среднего прироста на протяжении следующих периодов времени: 1985–2004, 2005–2011, 2012–2017 гг.

Таблица 1

Шкала категорий состояния хвойных деревьев (по [23])

№	Категория	Состояние
1	Здоровые (без признаков ослабления)	Крона густая (для данной породы, возраста и условий местопрорастания); хвоя (листва) зеленая; прирост текущего года нормального размера
2	Ослабленные	Крона разреженная; хвоя светло-зеленая; прирост уменьшен, но не более чем наполовину; отдельные ветви засохли
3	Сильно ослабленные	Крона ажурная; хвоя светло-зеленая, матовая; прирост слабый, менее половины обычного; усыхание ветвей до 2/3 кроны; плодовые тела трутовых грибов или характерные для них дупла
4	Усыхающие	Крона сильно ажурная; хвоя серая, желтоватая или желто-зеленая; прирост очень слабый или отсутствует; усыхание более 2/3 ветвей
5	Свежий сухостой	Хвоя серая, желтая или красно-бурая; кора частично опала
6	Старый сухостой	Живая хвоя (листва) отсутствует; кора и мелкие веточки осыпались частично или полностью; стволовые вредители вылетели; в стволе мицелий дереворазрушающих грибов, снаружи плодовые тела трутовиков

Результаты исследования и их обсуждение

Каждое обследованное дерево на ПП характеризовалось девятью переменными: категорией состояния; шестью показателями среднего радиального прироста и стандартного отклонения радиального прироста в течение 1985–2004 гг., 2005–2011 гг. и 2012–2017 гг.; диэлектрическими характеристиками R_0 и $2r$. В табл. 2 приведено распределение исследованных деревьев по категориям состояния на изученных ПП.

Таблица 2

Распределение деревьев на ПП по категориям состояния

Категория состояния дерева	Количество деревьев на ПП, шт.		
	Выдринная	Бабушкин	Култук
1	23	0	0
2	0	0	3
3	0	8	7
4	0	12	4
5	0	8	2
Всего деревьев, шт.	23	28	16
Средняя категория состояния	1	4	3,3

Для сопоставления радиальных приростов с диэлектрическими показателями использовался метод канонических корреляций [28] и рассчитывались канони-

ческие корреляции между матрицей радиальных приростов и стандартных отклонений размерностью (67×6) и матрицей диэлектрических показателей размерностью (67×2). Метод канонических корреляций позволяет исследовать зависимость между двумя множествами переменных: множеством L переменных, характеризующих радиальный прирост; множеством T переменных, характеризующих диэлектрические показатели тканей ствола дерева. Для двух множеств, содержащих соответственно 6 и 2 переменных, канонический анализ позволяет получить силу связей между линейными комбинациями переменных в каждом множестве:

$$w(i) = \sum_{k=1}^6 a(k)d(i, k);$$

$$v(i) = b(1)R_0(i) + b(2)2r(i).$$

Канонические веса $a(k)$, $b(1)$ и $b(2)$ характеризуют влияние конкретных переменных на канонические переменные w и v . Для расчета канонических переменных использовался пакет Statistica 10.0.

Расчеты показали, что для рассмотренных групп переменных коэффициент канонической корреляции равен 0,707, критерий χ^2 , характеризующий значимость канонической корреляции между L и T группами переменных, равен 44,68 и коэффициент канонической корреляции значим на уровне $p = 0,0000118$.

В табл. 3 приведены значения канонических весов для L и T групп переменных.

Таблица 3

Канонические веса для L и T групп переменных

Группа переменных	Переменная*	Веса для канонических переменных w и v
L	$d1$	0,087
	$s1$	-0,387
	$d2$	-1,213
	$s2$	0,803
	$d3$	-0,106
	$s3$	0,132
T	R_0	-0,358
	$2r$	1,028

* $d1$ и $s1$; $d2$ и $s2$; $d3$ и $s3$ – среднее значение и стандартное отклонение значений годовых колец соответственно для периодов 1985–2004 гг., 2005–2011 гг. и 2012–2017 гг.

Как следует из данных табл. 3, наибольший вклад в абсолютное значение канонической переменной $w(i)$ вносят средние значения и стандартное отклонение значений годовых колец для периода 2005–2011 гг., а вклад в $w(i)$ средних значений и стандартных отклонений значений годовых колец для периодов 1985–2004 гг. и 2012–2017 гг. существенно меньше.

Значения канонических переменных для каждого i -го дерева можно вычислить, используя следующие выражения:

$$w(i) = \sum_{k=1}^6 a(i) \frac{x(i, k) - \bar{x}(k)}{\sigma(k)} \rightarrow v(i) = b(1) \frac{R_0(i, k) - \bar{R}_0}{\sigma(R_0)} + b(2) \frac{2r(i, k) - 2\bar{r}}{\sigma(2r)},$$

где $\bar{x}(k)$ и $\sigma(k)$ – среднее значение и стандартное отклонение k -й переменной радиального прироста для всех деревьев; \bar{R}_0 и $\sigma(R_0)$ – среднее значение и стандартное отклонение переменной R_0 для всех деревьев; $2\bar{r}$ и $\sigma(2r)$ – среднее значение и стандартное отклонение переменной $2r$ для всех деревьев.

На рис. 5 отражена связь между значениями первой канонической переменной для L - и T -множеств.

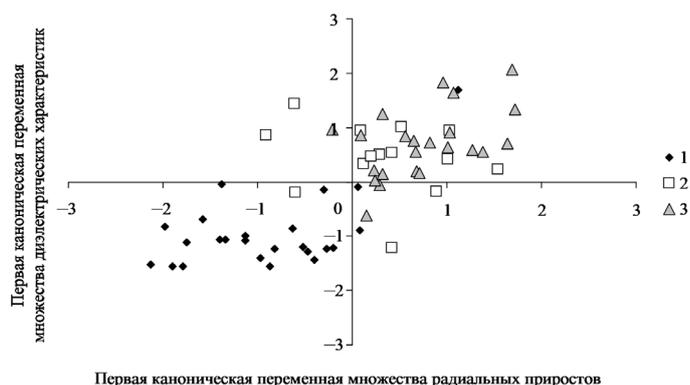


Рис. 5. Связь между значениями канонических переменных $w(i)$ и $v(i)$: 1 – деревья категорий 1 и 2; 2 – деревья категории 3; 3 – деревья категорий 4 и 5

Fig. 5. Correlation between the values of the canonical variables $w(i)$ and $v(i)$: 1 – trees of rank 1 and 2; 2 – trees of rank 3; 3 – trees of rank 4 and 5

Так как у деревьев с большим радиальным приростом $d2$ и $d3$ значение канонической переменной $w(i)$ снижается (знаки весов соответствующих переменных отрицательны), то деревьям категорий 1 и 2 с большим радиальным приростом соответствуют меньшие значения канонической переменной $w(i)$. Напротив, деревьям категорий 4 и 5 с меньшим радиальным приростом соответствуют большие значения канонической переменной $w(i)$.

Для разделения деревьев разных категорий состояния по значениям канонических переменных $w(i)$ и $v(i)$ использовался метод дискриминантного анализа. В табл. 4 приведены значения и доверительные вероятности λ -критерия Вилкса для групп переменных.

Таблица 4

Значения и доверительные вероятности λ -критерия Вилкса для L и T групп переменных

Группа переменных	λ -критерий Вилкса	Парциальный λ -критерий	F-критерий	p-уровень достоверности
L	0,49	0,76	9,75	0,0002
T	0,46	0,82	6,77	0,0022

Обе группы переменных дают значимый вклад в дискриминацию деревьев по категориям состояния. Классификационная матрица для разделения деревьев по категориям состояния с помощью канонических переменных (табл. 5)

указывает на высокую вероятность разделения деревьев категорий 1 и 2 и категорий 4–5 по значениям канонических переменных.

Таблица 5

Классификационная матрица для разделения деревьев по категориям состояния 1–5 с помощью канонических переменных

Категории состояния деревьев по визуальным признакам	Процент корректно идентифицированных деревьев	Категории состояния 1–5 деревьев по каноническим диэлектрическим характеристикам		
		1+2	3	4+5
1+2	88,46	23	0	3
3	20,00	2	3	10
4+5	92,31	1	1	24
<i>Всего</i>	74,63	26	4	37

Как видно, по диэлектрическим показателям трудно выделить деревья категории 3. Однако следует заметить, что характерное время их существования невелико, этапы ослабления проходятся этими деревьями достаточно быстро, и если на начальных этапах ослабления некоторые деревья категории 3 могут не отличаться по своим показателям от категории 2, то на поздних этапах ослабления деревья категории 3 по диэлектрическим характеристикам не отличаются от категории 4 и 5. Однако использовать диэлектрические параметры для классификаций деревьев категорий 4 и 5 не нужно, их состояние хорошо определяется по визуальным признакам (отсутствие хвои, потеря коры и т. п.). Деревья категории 3 (особенно на начальных этапах ослабления) по визуальным признакам плохо отличимы от категорий 1 и 2. Но для диагностических целей важно отделить деревья категорий 1, 2 от категории 3, т. к. именно деревья категории 3 являются кандидатами на отпад, и необходимо оценить долю таких образцов в насаждении. В табл. 6 приведена классификационная матрица, характеризующая разделение деревьев категорий 1, 2 и 3 по значениям канонических диэлектрических переменных.

Таблица 6

Классификационная матрица для разделения деревьев по категориям состояния 1, 2 и 3 с помощью канонических переменных

Категории состояния деревьев по визуальным признакам	Процент корректно идентифицированных деревьев	Категории состояния 1, 2, 3 деревьев по каноническим диэлектрическим показателям	
		1+2	3
1+2	88,46	23	3
3	86,67	2	13
<i>Всего</i>	87,80	25	16

Таким образом, если трудно различить деревья категорий состояния 1, 2 и 3 по визуальным показателям, то, используя канонические диэлектрические переменные, возможно разделить по диэлектрическим показателям трудно различимые по визуальным признакам здоровые деревья категорий 1 и 2 и находящиеся на ранних стадиях ослабления деревья категории 3 с вероятностью около

0,90. Деревья категории 3, по внешнему виду схожие с деревьями категорий 1 и 2, по своим диэлектрическим характеристикам уже неотличимы от категорий 4 и 5 и значимо отличаются по диэлектрическим характеристикам от категорий 1 и 2. Таким образом, сопряженная диагностика по визуальным и диэлектрическим показателям позволяет точнее классифицировать состояние деревьев в насаждении.

Заключение

Существуют очень тесные связи между визуальными категориями состояния деревьев, их радиальным приростом и диэлектрическими характеристиками тканей ствола. Последние, как показал анализ, можно использовать для экспресс-оценки состояния дерева. Данные классификационной матрицы для разделения деревьев по характеристикам состояния с помощью диэлектрических показателей свидетельствуют, что, используя их, можно получить достаточно надежные средние оценки состояния деревьев в насаждении. Полная автоматизация измерений с помощью диэлектрического спектрометра и их быстрота (для измерения диэлектрических показателей отдельного дерева требуется примерно 1 с) открывают возможности оценки состояния деревьев на ранних этапах их ослабления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Белов А.В., Лямкин В.Ф., Соколова Л.П. Картографическое изучение биоты. Иркутск: Облмашинформ, 2002. 160 с. [Belov A.V., Lyamkin V.F., Sokolova L.P. *Cartographic Study of Biota*. Irkutsk, Oblmashinform Publ., 2002. 160 p.]

2. Воронин В.И. Бактериальная водянка хвойных в байкальских лесах: причины возникновения и риск эпифитотии // Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием и школы молодых ученых «Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды», Иркутск, 10–15 июля 2018 г.: в 2 ч. Иркутск: Ин-т географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. 2018. С. 9–12. [Voronin V.I. Bacterial Infections of the Coniferous in the Baikal Forests: Causes and Risks of Epiphytetics. *Book of Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation and Schools of Young Scientists "Mechanisms of Resistance of Plants and Microorganisms to Unfavorable Environmental"*: In 2 Parts. Irkutsk, July 10–15, 2018. Irkutsk, V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS Publ., 2018, pp. 9–12]. DOI: [10.31255/978-5-94797-319-8-9-12](https://doi.org/10.31255/978-5-94797-319-8-9-12)

3. Воронин В.И., Соков М.К. Влияние сероорганических компонентов атмосферных выбросов на пихту сибирскую // Лесоведение. 2005. № 2. С. 62–64. [Voronin V.I., Sokov M.K. The Influence of Sulfurorganic Components of Atmospheric Emissions on Siberian Fir. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2005, no. 2, pp. 62–64].

4. Воронин В.И., Морозова Т.И., Ставников Д.Ю., Нечесов И.А., Осколков В.А., Буянтуйев В.А., Михайлов Ю.З., Говорин Я.В., Середкин А.Д., Шуварков М.А. Бактериальное повреждение кедровых лесов Прибайкалья // Лесн. хоз-во. 2013. № 3. С. 39–41. [Voronin V.I., Morozova T.I., Stavnikov D.Yu., Nechesov I.A., Oskolkov V.A., Buyantuyev V.A., Mikhaylov Yu.Z., Govorin Ya.V., Seredkin A.D., Shuvarkov M.A. Bacterial Damage of Cedar Forests of the Baikal Region. *Lesnoe khozaistvo*, 2013, no. 3, pp. 39–41].

5. Голодрига П.Я., Осипов А.В. Экспресс-метод и приборы для диагностики морозоустойчивости растений // Физиология и биохимия культурных растений. 1972. Т. 4,

вып. 6. С. 650–655. [Golodriga P.Ya., Osipov A.V. Express Method and Instruments for Diagnosing Frost Resistance of Plants. *Fiziologiya i biokhimiya kul'turnykh rasteniy*, 1972, vol. 4, iss. 6, pp. 650–655].

6. Григорьев А.И. Эколого-физиологические основы адаптации древесных растений в лесостепи Западной Сибири. Омск: Изд-во ОмГПУ, 2008. 195 с. [Grigor'yev A.I. *Ecological and Physiological Basis of Adaptation of Woody Plants in the Forest-Steppe of Western Siberia*. Omsk, OSPU Publ., 2008. 195 p.].

7. Грязькин А.В., Герасюта С.М., Бернацкий Д.П., Трубачева Т.А., Ковалев Н.В. Изменчивость величины импеданса древесных пород // Изв. СПбЛТА. 2012. № 198. С. 11–17. [Gryazkin A.V., Gerasjuta S.M., Bernatskij D.P., Trubacheva T.A., Kovalev N. Variability of Size of an Impedance of Tree Species. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2012, no. 198, pp. 11–17].

8. Гусев Ю.А. Основы диэлектрической спектроскопии. Казань: Изд-во КГУ. 2008. 112 с. [Gusev Yu.A. *Fundamentals of Dielectric Spectroscopy*. Kazan, KSU Publ., 2008. 112 p.].

9. Дonyaкина С.С., Ковалев А.В., Тарасова О.В., Пальникова Е.Н., Астапенко С.А., Суховольский В.Г. Устойчивость пихты сибирской к ксилофагам: сопоставление визуальных и инструментальных оценок // Хвойные бореальной зоны. 2013. Т. XXXI, № 3–4. С. 26–30. [Donyakina S.S., Kovalev A.V., Tarasova O.V., Palnikova E.N., Astapenko S.A., Soukhovolsky V.G. The Stability of Fir Trees to Xylophages: Comparison of Visual and Instrumental Estimations. *Hvojnye boreal'noy zony* [Coniferous of the boreal area], 2013, vol. XXXI, no. 3–4, pp. 26–30].

10. Зубкова Т.А., Мартынова Н.А., Белоусов В.М. Электрическое сопротивление структурных элементов биогеоценозов // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер.: Наука о Земле. 2011. Т. 4, № 2. С. 82–89. [Zubkova T.A., Martynova N.A., Belousov V.M. Electrical Resistance of Structural Elements of the Forest Biogeocoenoses. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle»* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series “Earth Sciences”], 2011, vol. 4, no. 2, pp. 82–89].

11. Каширо Ю.П., Хасанов Н.Х., Дорожкин Е.М. Электрическое сопротивление тканей прикамбиального комплекса ствола у сосны обыкновенной и его диагностические возможности // Леса Урала и хозяйство в них: сб. науч. тр. Свердловск: УРГУ, 1988. Вып. 14. С. 183–184. [Kashiro Yu.P., Khasanov N.Kh., Dorozhkin E.M. Electrical Resistance of Tissues of the Trunk Cambial Complex of Scots Pine and Its Diagnostic Capabilities. *Forests of the Urals and Management in Them: Collection of Academic Papers*. Sverdlovsk, URGU Publ., 1988, iss. 14, pp. 183–184].

12. Ковалев А.В., Суховольский В.Г. Диэлектрический спектрометр для экспрессной оценки состояния растений // Мониторинг и биологические методы контроля вредителей и патогенов древесных растений: от теории к практике. Красноярск: ИЛ СО РАН. 2016. С. 105–106. [Kovalev A.V., Soukhovolsky V.G. Dielectric Spectrometer for Express State Estimation of Plants. *Monitoring and Biological Methods for Control of Pests and Pathogens of Woody Plants: From Theory to Practice*. Krasnoyarsk, IF SB RAS Publ., 2016, pp. 105–106].

13. Ковалев А.В., Якуш Р., Пальникова Е.Н., Суховольский В.Г. Диэлектрическая фурье-спектроскопия в оценке состояния деревьев в очагах массового размножения короедов // Хвойные бореальной зоны. 2016. Т. XXXIV, № 1–2. С. 44–51. [Kovalev A. Jakush R., Palnikova E., Soukhovolsky V. Dielectric Fourier Spectroscopy to Assess the Condition of the Trees in the Outbreaks of Bark Beetles. *Hvojnye boreal'noy zony* [Coniferous of the boreal area], 2016, vol. XXXIV, no. 1–2, pp. 44–51].

14. Краснобаев В.А., Воронин В.И. Аномальные оттепели как одна из причин повреждений кроны молодых хвойных деревьев в Южном Прибайкалье // География и при-

родные ресурсы. 2011. № 2. С. 75–78. [Krasnobayev V.A., Voronin V.I. Anomalous Thaws as a Cause of Young Coniferous Tree Crown Damage in the Southern Baikal Region. *Geographiya i prirodnyye resursy* [Geography and Natural Resources], 2011, no. 2, pp. 75–78].

15. Курило Ю.А., Григорьев А.И. Электрическое сопротивление как показатель устойчивости древесных растений в условиях нефтяного загрязнения // Проблемы региональной экологии. 2010. № 5. С. 111–115. [Kurilo Ju.A., Grigoriev A.I. Electric Resistance as an Indicator of Viability of Wood Plants. *Problemy regional'noy ekologii*, 2010, no. 5, pp. 111–115].

16. Курило Ю.А., Григорьев А.И. Изучение электрического сопротивления древесных растений в условиях нефтяного загрязнения почвы (на примере березы повислой) // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 3. Режим доступа: <https://science-education.ru/pdf/2015/3/69.pdf> (дата обращения: 18.08.18). [Kurilo Yu.A., Grigoriev A.I. The Study of the Electrical Resistance of Woody Plants in Conditions of Oil Contamination of Soil (for Example *Betula pendula*). *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2015, no. 3]. DOI: [10.17513/spno.2015.3](https://doi.org/10.17513/spno.2015.3)

17. Курило Ю.А., Григорьев А.И. Применение электрометрического метода для диагностики влияния нефтешлама на жизнедеятельность березы повислой // Лесоведение. 2019. № 4. С. 304–310. [Kurilo Yu.A., Grigoriev A.I. Effect of Duration of Oil Sludge on Vital Activity of Silver Birch (*Betula pendula* Roth.) Studied by Electrical Method. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2019, no. 4, pp. 304–310]. DOI: [10.1134/S002411481904003X](https://doi.org/10.1134/S002411481904003X)

18. Кушнеренко М.Д., Курчатова Г.П., Штефьрыца А.А., Печерская О.Н., Киевцова Е.В., Баштовая С.И. Комплексный метод определения жаро- и засухоустойчивости растений прибором «ТУРГОРОМЕР-1» (Т-1) // Экспресс-методы диагностики жаро-засухоустойчивости и сроков налива растений. Кишинев: ШТИЧИЦА, 1986. 36 с. [Kushnarenko M.D., Kurchatova G.P., Shtefyrtsa A.A., Pecherskaya O.N., Kiyevtsova E.V., Bashtovaya S.I. A Complex Method for Determining Heat and Drought Tolerance of Plants with the Device “TURGOROMER-1” (T-1). *Express Methods for Diagnosis of Heat and Drought Tolerance and Timing of Plant Ripening*. Kishinev, ShTICHITsA Publ., 1986. 36 p.].

19. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука, 1990. 200 с. [*Forest Ecosystems and Atmospheric Pollution*. Leningrad, Nauka Publ., 1990. 200 p.].

20. Маторкин А.А., Карасева М.А. Информативность импеданса прикамбиального комплекса тканей деревьев хвойных пород при диагностике их жизнеспособности // Современная физиология растений: от молекул до экосистем: материалы докл. Междунар. конф. Сыктывкар, 18–24 июня 2007 г. Сыктывкар, Коми НЦ УрО РАН, 2007. Ч. 2. С. 265–266. [Matorkin A.A., Karaseva M.A. Self-Descriptiveness of Impedance of Complex Adjacent to Cambium in Coniferous Tissues for Their Viability. *Proceedings of the International Conference “The Modern Plant Physiology: From Molecules to Ecosystems”, June 18–24 2007, Syktyvkar*. Syktyvkar, 2007, part 2, pp. 265–266].

21. Плешанов А.С., Морозова Т.И. Микромицеты пихты сибирской и атмосферное загрязнение лесов. Новосибирск: Гео, 2009. 115 с. [Pleshonov A.S., Morozova T.I. *Micromycetes of Siberian Fir and Atmospheric Pollution of Forests*. Novosibirsk, Geo Publ., 2009. 115 p.].

22. Положенцев П.А., Золотов Л.А. Динамика электрического сопротивления тканей луба сосны как индикатор изменения их физиологического состояния // Физиология растений. 1970. Т. 17, вып. 4. С. 830–835. [Polozhentsev P.A., Zolotov L.A. Dynamics of Electrical Resistance of Pine Bast Tissues as an Indicator of Changes in Their Physiological State. *Physiologiya rasteniy* [Soviet Journal of Plant Physiology], 1970, vol. 17, no. 4, pp. 830–835].

23. Правила санитарной безопасности в лесах: постановление Правительства Российской Федерации от 20 мая 2017 года № 607. М., 2017. [*Rules of Sanitary Safety in Forests: Decree of the Government of the Russian Federation of May 20, 2017 No. 607*. Moscow, 2017].

24. Раннев Г.Г., Тарасенко А.П. Методы и средства измерений. М.: Академия, 2004. 336 с. [Rannev G.G., Tarasenko A.P. *Methods and Tools of Measurement*. Moscow, Akademiya Publ., 2004. 336 p.].

25. Суховольский В.Г. Моделирование роста деревьев и взаимодействия лесных насекомых с древесными растениями: оптимизационный подход: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Красноярск, 1996. 31 с. [Soukhovolsky V.G. *Modeling of Tree Growth and Interactions of Forest Insects with Woody Plants: An Optimization Approach*: Dr. Biol. Sci. Diss. Abs. Krasnoyarsk, 1996. 31 p.].

26. Суховольский В.Г., Ковалев А.В., Сотниченко Д.В. Диэлектрическая спектроскопия прикамбиального комплекса тканей и экспресс-диагностика состояния древесных растений // Эколого-географические аспекты лесообразовательного процесса. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2009. С. 335–336. [Soukhovolsky V.G., Kovalev A.V., Sotnichenko D.V. Dielectric Spectroscopy of the Near-Cambial Complex of Tissues and Express State Diagnostics of Woody Plants. *Ecological and Geographical Aspects of Forest Formation*. Krasnoyarsk, IF SB RAS Publ., 2009, pp. 335–336].

27. Тарусов Б.Н. Электропроводность как метод определения жизнеспособности ткани // Арх. ботан. наук. 1938. Т. 52, вып. 2. С. 5–16. [Tarusov B.N. Electrical Conductivity as a Method for Determining Tissue Viability. *Arkhiv botanicheskikh nauk*, 1938, vol. 52, iss. 2, pp. 5–16].

28. Халафян А.А. Statistica 6. Статистический анализ данных. М.: Бином-Пресс. 2007. 512 с. [Khalafyan A.A. *Statistica 6. Statistical Data Analysis*. Moscow, Binom-Press Publ., 2007. 512 p.].

29. Хамадулин Э.Ф. Основы радиоэлектроники. Методы и средства измерений. М.: Юрайт, 2018. 365 с. [Khamadulin E.F. *Fundamentals of Radio Electronics. Methods and Tools of Measurement*. Moscow, Urait Publ., 2018. 365 p.].

30. Шеверножук Р.Г. Биоэлектрическая активность ели в насаждениях, методика ее измерения // Изв. вузов. Лесн. журн. 1968. № 4. С. 36–40. [Shevernozhuk R.G. Bioelectric Activity of Spruce in Plantations, the Method for Its Measurement. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1968, no. 4, pp. 36–40]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1968/201968.pdf>

31. Шихмарёв В.Ю. Технические измерения и приборы. М.: Юрайт, 2019. 377 с. [Shishmarev V.Yu. *Technical Measurements and Devices*. Moscow, Urait Publ., 2019. 377 p.].

32. Carter J.K., Blanchard R.O. Electrical Resistance Related to Phloem Width in Red Maple. *Canadian Journal of Forest Research*, 1978, vol. 8, no. 1, pp. 90–93. DOI: [10.1139/x78-015](https://doi.org/10.1139/x78-015)

33. Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and Absorption in Dielectrics. I. Alternating Current Characteristics. *The Journal of Chemical Physics*, 1941, vol. 9, iss. 4, pp. 341–351. DOI: [10.1063/1.1750906](https://doi.org/10.1063/1.1750906)

34. Davis W., Shigo A., Weyrick R. Notes: Seasonal Changes in Electrical Resistance of Inner Bark in Red Oak, Red Maple, and Eastern White Pine. *Forest Science*, 1979, vol. 25, iss. 2, pp. 282–286. DOI: [10.1093/forestscience/25.2.282](https://doi.org/10.1093/forestscience/25.2.282)

35. Feldman Y., Ermolina I., Hayashi Y. Time Domain Dielectric Spectroscopy Study of Biological Systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003, vol. 10, iss. 5, pp. 728–753. DOI: [10.1109/TDEI.2003.1237324](https://doi.org/10.1109/TDEI.2003.1237324)

36. Fissenko S., Fissenko M. Vegetation Variations of Electric Resistance of Trees. *International Scientific Review*, 2016, no. 18(28), pp. 39–43.

37. Gabriel S., Lau R.W., Gabriel C. The Dielectric Properties of Biological Tissues: II. Measurements in the Frequency Range 10 Hz to 20 GHz. *Physics in Medicine & Biology*, 1996, vol. 41, no. 11, pp. 2251–2269. DOI: [10.1088/0031-9155/41/11/002](https://doi.org/10.1088/0031-9155/41/11/002)
38. Ksenzhek O., Petrova S., Kolodyazhny M. Electrical Properties of Plant Tissues. Resistance of a Maize Leaf. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, 2004, no. XXX, no. 3-4, pp. 61–67.
39. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Ed. by Cook E.R., Kairiukstis L.A. Dordrecht, Springer, 1990. 394 p. DOI: [10.1007/978-94-015-7879-0](https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0)
40. Rinn F. *TSAP Version 3.5. Reference Manual. Computer Program for Tree-Ring Analysis and Presentation*. Heidelberg, Frank Rinn Distribution, 1996. 264 p.
41. Schanne O.F., Ruiz P., Ceretti E. *Impedance Measurements in Biological Cells*. New York, John Wiley & Sons, 1978. 430 p.
42. Shortle W.S., Shigo A.L., Berry P., Abusambra J. Electrical Resistance in Tree Cambium Zone: Relationship to Rates of Growth and Wound Closure. *Forest Science*, 1977, vol. 23, iss. 3, pp. 326–329. DOI: [10.1093/forestscience/23.3.326](https://doi.org/10.1093/forestscience/23.3.326)
43. Soukhovolsky V. Insects-Xylophages in Sayan Mountain Forests after Windthrow: Population Dynamics Models. *Insects and Fungi in Storm Areas: Proceedings of the IUFRO Working Party 7.03.10 Methodology of Forest Insect and Disease Survey in Central Europe, November 30, 2009, Zvolen, Slovakia*. Zvolen, National Forest Centre, 2009, pp. 20–23.
44. Wargo P.M., Skutt H.R. Resistance to Pulsed Electrical Current: An Indicator of Stress in Forest Trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 1975, vol. 5(4), pp. 557–561. DOI: [10.1139/x75-081](https://doi.org/10.1139/x75-081)

EXPRESS ESTIMATION OF THE PHYSIOLOGICAL STATE OF WOODY PLANTS BY DIELECTRIC CHARACTERISTICS OF TREE STEM TISSUES

Vladislav G. Soukhovolsky¹, Doctor of Biology, Prof.; ResearcherID: [K-1740-2018](https://orcid.org/0000-0003-0407-2290),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0407-2290>

Viktor I. Voronin², Doctor of Biology; ResearcherID: [N-8292-2013](https://orcid.org/0000-0002-1467-9865),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1467-9865>

Vladimir A. Oskolkov³, Candidate of Biology; ResearcherID: [K-1961-2018](https://orcid.org/0000-0002-4339-1094),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4339-1094>

Anton V. Kovalev³, Candidate of Engineering; ResearcherID: [K-1756-2018](https://orcid.org/0000-0002-9744-768X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9744-768X>

¹Sukachev Institute of Forest SB RAS, Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; e-mail: soukhovolsky@yandex.ru

²Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, ul. Lermontova, 132, Irkutsk, 664033, Russian Federation; e-mail: bioin@sifibr.irk.ru, vosk@sifibr.isk.ru

³Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 50, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation; e-mail: sunhi.prime@gmail.com

Abstract. Dielectric spectroscopy methods for estimating the state of trees were considered. Dielectric characteristics describe cell membranes and conductivity of plant tissues. A pulsed Fourier transform dielectric spectrometer of an original design was used to measure the values of dielectric characteristics. The spectrometer was connected to a portable computer, which was used to control and power it. The device design allows to expressly (in about 1s) receive information on the dielectric characteristics of the tree trunk tissues in the frequency range from 1 to 100 kHz and to process, visualize and save the results of measurements on a computer in

the field conditions. Tree state estimates obtained with the pulsed Fourier transform dielectric spectrometer were compared with the visual tree characteristics and radial growth data. It is shown that there are differences in the values of dielectric characteristics in trees of different state categories and with different values of radial growth. Dielectric spectroscopy data, unlike subjective qualitative visual indicators of tree state, are quantitative and objective. The data can be obtained much faster and with less effort compared to estimates of tree characteristics by radial growth. The described method was used to estimate the state of Siberian pine (*Pinus sibirica*), Siberian fir (*Abies sibirica*) and Siberian spruce (*Picea obovata*) in forest plantations of the Baikal region. Studies were carried out both in control (undamaged) plantations and in those affected by bacterial infection. It is shown that the proposed method can be applied to the express state estimation of trees and the level of their damage.

For citation: Soukhovolsky V.G., Voronin V.I., Oskolkov V.A., Kovalev A.V. Express Estimation of the Physiological State of Woody Plants by Dielectric Characteristics of Tree Stem Tissues. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 70–85. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-70-85

Funding: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 17-29-05074офи_м).

Keywords: tree state, visual estimation, radial growth, dielectric characteristics, express measurements.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
The authors declare that there is no conflict of interest*

Поступила 16.12.19 / Received on December 16, 2019
