

УДК 577.3

**Н.Ю. Евсикова, Н.Н. Матвеев, О.М. Корчагин,
Н.С. Камалова, В.Ю. Заплетин**

Евсикова Наталья Юрьевна родилась в 1971 г., окончила в 1994 г. Воронежский государственный университет, магистр физики, ассистент кафедры общей и прикладной физики Воронежской государственной лесотехнической академии. Имеет 18 научных работ в области электрофизики полимеров.
E-mail: vglta@vglta.vrn.ru



Матвеев Николай Николаевич родился в 1948 г., окончил в 1972 г. Воронежский государственный университет, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и прикладной физики, проректор по учебной работе Воронежской государственной лесотехнической академии. Имеет более 180 научных работ в области электрофизики полимеров.
E-mail: vglta@vglta.vrn.ru



Корчагин Олег Михайлович родился в 1964 г., окончил в 1986 г. Воронежский лесотехнический институт, кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений Воронежской государственной лесотехнической академии. Имеет свыше 40 научных работ в области экологической физиологии, анатомии и морфологии древесных растений.
E-mail: korchagin@mail.ru



Камалова Нина Сергеевна родилась в 1971 г., окончила в 1994 г. Воронежский государственный университет, магистр физики, ассистент кафедры общей и прикладной физики Воронежской государственной лесотехнической академии. Имеет 30 научных работ в области электрофизики полимеров.
E-mail: vglta@vglta.vrn.ru



Заплетин Владимир Юрьевич родился в 1982 г., окончил в 2005 г. Воронежскую государственную лесотехническую академию, аспирант кафедры экологии, защиты леса и лесного охотоведения ВГЛТА. Имеет 14 научных работ в области экологической анатомии и морфологии прегенеративных особей дуба черешчатого.
E-mail: vlad_dimir@nextmail.ru



СКАНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В СТВОЛАХ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ КАК МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Предложена модель возникновения электрического поля в стволах древесных растений. Приведены результаты измерений разности потенциалов в радиальном направлении в стволах березы. Установлена зависимость характера изменения разности потенциалов в древесине ствола от жизненного состояния дерева и изменения температуры окружающей среды.

Ключевые слова: разность потенциалов, ствол древесного растения, береза повислая, изменение температуры, целлюлоза, лигнин.

Древесина – очень сложная для теоретического анализа структура. Основными по содержанию компонентами ее клеточных стенок являются высокомолекулярные соединения: целлюлоза и лигнин [2]. Это позволяет при изучении физико-механических свойств древесины применять методы физики полимеров. Анализ литературных источников [1, 3] показывает, что вытянутая цепь макромолекулы целлюлозы обладает симметрией винтовой линии второго порядка и обнаруживает полярные свойства вдоль своей длины. Это говорит о наличии спонтанной поляризованности целлюлозы в отсутствие внешнего электрического поля. Надмолекулярные группировки, состоящие из параллельных рядов предельно сближенных участков макромолекулярных цепей, образуют мицеллы (кристаллиты). Согласно известной модели Мейера–Миша [2], кристаллическая решетка природной целлюлозы имеет моноклинную сингонию. Кристаллы такой системы проявляют пиро- и пьезоэлектрические свойства, т.е. их спонтанная поляризованность меняется при изменении температуры (пироэлектрический эффект) и воздействии на них механического напряжения (пьезоэлектрический эффект). До 70 % древесной целлюлозы находится в кристаллическом состоянии. Лигнин (второй по содержанию компонент древесины) является аморфным изотропным веществом. Таким образом, «виновником» пиро- и пьезоэлектрических свойств древесины считается целлюлоза – ориентированный компонент клеточных стенок [1, 3].

Существование явления поляризации в живом дереве, влияние жизненного состояния и изменения температуры окружающей среды на электрические поля в нем и возможное биологическое значение этого явления – важные проблемы при прогнозировании жизненного состояния древесных растений.

Нами была предложена полимерная модель, рассматривающая древесину как кристаллическую целлюлозу в сшитом эластомере – лигнине, имеющем коэффициенты теплового расширения и сжатия в десятки раз большие, чем у кристаллов. Такая модель позволяет оценивать влияние на древесину различных физико-механических факторов.

В естественных условиях в древесине при изменении температуры окружающей среды на величину ΔT , ввиду слабой теплопроводности, создается неоднородное температурное поле, вызывающее поляризационный эффект [3]. Возникающее при этом тепловое сжатие (или расширение) лигнина вызывает пьезоэлектрический эффект в кристаллической целлюлозе, а деформация пьезокристалла в поле спонтанной поляризации сопровождается появлением электрического поля термического происхождения. Моделируя древесный ствол бесконечно длинным (поскольку высота в десятки раз превышает диаметр) однородным цилиндром радиуса R и полагая, что пироэлектрические коэффициенты, диэлектрическая проницаемость и пьезоэлектрические модули не зависят от координат, автор [5] получил выражение для напряженности электрического поля в радиальном направлении древесного ствола:

$$E(r) = E_0 \left(1 - 0,72 \frac{r^2}{R^2}\right) \exp(-5,7at/R^2),$$

где r – расстояние от оси ствола;
 R – радиус ствола;

$$a = \frac{\lambda_0}{c_0 \rho_0} \text{ – температуропроводность;}$$

λ_0 , c_0 и ρ_0 – теплопроводность, теплоемкость и плотность, соответствующие породе дерева;

E_0 – модуль максимальной напряженности электрического поля,

$$E_0 = \frac{1,6\Delta T}{\varepsilon_0 \varepsilon_i} (d_{ijk} c_{ijkl} \alpha_{kl} - \gamma_i).$$

Здесь ΔT – изменение температуры;

ε_i – диэлектрическая проницаемость;

d_{ijk} – тензор пьезоэлектрических модулей;

c_{ijkl} – константы упругости;

α_{kl} – компоненты тензора деформаций;

γ_i – пирозлектрический коэффициент целлюлозы.

Очевидно, что E_0 прямо пропорционален ΔT , если γ_i , ε_i , d_{ijk} , c_{ijkl} и α_{kl} не являются функциями температуры, и зависит от жизненного состояния и условий произрастания дерева.

Выражение для разности потенциалов вдоль радиуса ствола дерева имеет следующий вид:

$$U(r) = U_0 \left(0,76 - \frac{r}{R} + \left(\frac{r}{R} \right)^3 \right),$$

где $U_0 \sim E_0 R$ – максимальная разность потенциалов, зависящая от свойств древесины.

Для проверки теоретических положений были проведены измерения радиальной разности потенциалов вдоль радиуса ствола деревьев, произрастающих в естественных условиях.

В качестве объекта исследования была выбрана береза повислая (*Betula pendula* Roth.), образующая производные лесные экосистемы в Центральной лесостепи Российской Федерации. Объекты росли в порослевой дубраве Правобережного лесничества Учебно-опытного лесхоза Воронежской государственной лесотехнической академии в одних и тех же лесорастительных условиях и характеризовались относительно одинаковыми таксационными показателями: возраст – 55 лет, класс бонитета – III, жизненное состояние – 2 и 7 [4].

Разность потенциалов между центром ствола (0) и точками, расположенными вдоль радиуса ствола R (на расстоянии $0,25R$, $0,5R$ и R) на высоте 1,3 м от поверхности земли, измеряли в течение светового дня с 13 по 16

июля 2007 г. со средним интервалом между измерениями 1 ч. Параллельно в каждой точке определяли температуру воздуха.

Для измерения разности потенциалов использовали портативный цифровой мультиметр МУ 62. Чтобы получить относительно стабильные во времени результаты, электроды вживляли в центр и вдоль радиуса ствола. Для этого в объектах сверлили шурфы диаметром 5 мм. Электроды представляли собой стальные стержни, изолированные до поверхности контакта (4,5 мм) и соединенные с прибором посредством гибкого провода.

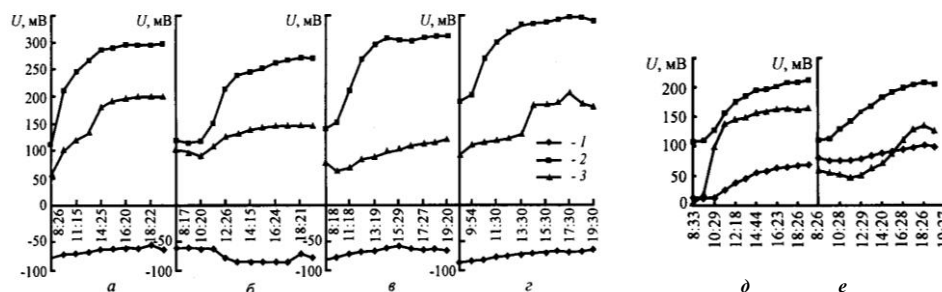
Результаты измерений показали, что разности потенциалов между центром ствола и наружным слоем древесины U_{0-R} у живых берез отличались несущественно (см. таблицу), а между центром и половиной радиуса $U_{0-0,5R}$ и между центром и четвертью радиуса $U_{0-0,25R}$ – существенно. При этом $U_{0-0,25R}$ у первой (1) березы имела отрицательное значение, у второй (2) – положительное. У мертвых берез (3, 4) отмечены существенные отличия в значениях $U_{0-0,25R}$ и U_{0-R} .

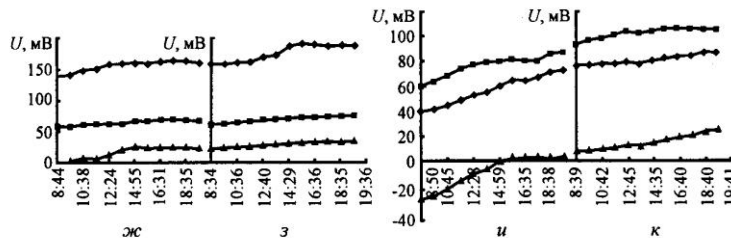
У живых берез (1 и 2) значение $U_{0-0,5R}$ оказалось почти в 4 раза больше, чем у мертвых, а U_{0-R} – в 8 раз больше. В то же время, $U_{0-0,25R}$ у мертвых берез значительно выше, чем у живых.

Сравнение разностей потенциалов у живых (1, 2) и мертвых (3, 4) берез

Показатель	Значение показателя, мВ									
	1	2	t_{1-2}	3	t_{1-3}	t_{2-3}	4	t_{1-4}	t_{2-4}	t_{3-4}
$U_{0...0,25R}$	-78,7±1,38	62,2±2,18	55,0	166,0±0,77	155,0	45,0	63,4±2,18	55,0	0,4	44,0
$U_{0...0,5R}$	292,8±1,76	203,0±2,92	26,0	70,2±0,60	120,0	45,0	80,6±1,04	104,0	39,0	9,0
$U_{0...R}$	194,3±2,91	159,8±1,25	11,0	25,8±0,31	58,0	104,0	4,00±1,11	62,0	95,0	22,0

У живых берез $U_{0-0,5R}$ не была постоянной в течение суток. Так, рано утром, во время первого замера, она во всех случаях минимальная (100 ... 150 мВ). Необходимо отметить, что чем раньше произведен замер, тем меньше разность потенциалов. С течением времени разность потенциалов возрастала до 300 мВ и более. С 14 до 19 часов варьирование показателя (см. рисунок а – е) было незначительным (до 10 мВ).





Изменение разности потенциалов во времени у живых 1 (*a–e*), 2 (*d, e*) и мертвых 3 (*ж, з*), 4 (*и, к*) берез: *a, d, ж, и* – 13.07.07; *б, e, з, к* – 14.07.07; *в* – 15.07.07; *г* – 16.07.07; 1 – 0,25R; 2 – 0,5R; 3 – R (по горизонтальной оси – время замера)

Величина U_{0-R} у живых берез также изменялась в течение суток: с утра – 50 ... 100 мВ, во второй половине дня – 120 ... 160 мВ. Закономерность ее изменения схожа с таковой между центром ствола и половиной радиуса, что подтверждает найденная корреляционная связь (коэффициент корреляции $r = 0,7 \pm 0,08$ – для березы 1, $r = 0,82 \pm 0,07$ – для березы 2).

Суточных колебаний разности потенциалов $U_{0-0,25R}$ не отмечено. Однако у живой березы 1 он относительно стабилен в течение 4 сут и составлял около $-80...-90$ мВ, у березы 2 отмечена тенденция к его увеличению во времени. Какой-либо четко выраженной корреляционной связи между $U_{0-0,25R}$ и $U_{0-0,5R}$, U_{0-R} не установлено.

Несмотря на то, что по абсолютному значению $U_{0-0,5R}$ и U_{0-R} различны, динамика изменения этих показателей у живых берез сходная: коэффициент корреляции по показателю $U_{0-0,5R}$ составил $0,943 \pm 0,023$, а по U_{0-R} – $0,863 \pm 0,054$. Динамика изменения $U_{0-0,25R}$ у каждой живой березы индивидуальна. Связи по этому показателю между живыми березами нами не установлено.

У мертвых берез в течение суток колебаний $U_{0-0,25R}$, $U_{0-0,5R}$ и U_{0-R} не отмечено (см. рисунки *ж – к*), но их изменение с течением времени различно. Так, у березы 4 выявлена тенденция к увеличению всех трех рассматриваемых показателей, а у березы 3 она выражена менее четко.

Все три показателя ($U_{0-0,25R}$, $U_{0-0,5R}$ и U_{0-R}) у мертвых берез четко коррелируют друг с другом. Так, по показателю $U_{0-0,25R}$ коэффициент корреляции $r = 0,883 \pm 0,04$, по $U_{0-0,5R}$ – $r = 0,857 \pm 0,054$, по U_{0-R} – $r = 0,980 \pm 0,008$.

Линейная зависимость между разностью потенциалов и температурой воздуха отмечена только для U_{0-R} у живых берез ($r = 0,63 \pm 0,13$).

Таким образом у живых берез $U_{0-0,5R}$ и U_{0-R} подвержены суточным колебаниям: с утра наблюдается их возрастание, во второй половине дня они относительно стабильны, ночью, вероятно, происходит их спад, но время нами не фиксировалось. У мертвых берез суточных колебаний разности потенциалов не выявлено. Следовательно, можно предположить, что изменение разности потенциалов в течение суток является признаком живого дерева и связано с изменением его физиологической активности.

Отсутствие изменения $U_{0-0,25R}$ у живых берез, на наш взгляд, можно объяснить тем, что ближе к сердцевине древесина утрачивает свою проводящую функцию и выполняет только запасающую и механическую. В проводящей ткани, как мы предполагаем, физиологическая активность значительно снижена. Большее значение $U_{0-0,25R}$ у мертвых берез по сравнению с живыми, возможно, связано с процессами вторичных изменений в структуре древесины.

У живых берез сходная тенденция характерна для $U_{0-0,5R}$ и U_{0-R} , при этом $U_{0-0,25R}$ варьирует. На наш взгляд, это связано с тем, что сердцевина у живых берез находится в различном состоянии. У мертвых берез все три показателя связаны корреляционно друг с другом, это свидетельствует о том, что их гибель наступила примерно в одно и тоже время и изменения в строении древесины из-за гниения сходны.

U_{0-R} у живых берез составляет около 100 ... 150 мВ, у мертвых – менее 20 мВ; $U_{0-0,5R}$ у живых берез – около 200 мВ, у мертвых – около 70 мВ. Следовательно, у живых берез эти показатели ($U_{0-0,5R}$ и U_{0-R}) в несколько раз больше т.е. их можно использовать для характеристики жизненного состояния дерева: чем выше $U_{0-0,5R}$ и U_{0-R} , тем выше уровень жизненного состояния. Низкие значения данных показателей у мертвых деревьев связаны, как мы предполагаем, с изменениями в структуре древесины из-за процессов гниения.

От изменения температуры воздуха зависит только U_{0-R} живых деревьев. На наш взгляд, это может быть объяснено тем, что температура внутри дерева и температура воздуха изменяются по-разному.

Выводы

1. электрофизики полимеров показано существование электрических полей в живых деревьях березы.
2. Установлено, что разности потенциалов между центром и серединой радиуса ствола ($U_{0-0,5R}$) и между центром и наружным слоем древесины (U_{0-R}) у живых деревьев варьируют в течение суток. Динамика изменения этих показателей у живых берез одинакова. У мертвых деревьев изменений не отмечено.
3. Выявлено, что $U_{0-0,5R}$ и U_{0-R} у живых деревьев в 3–8 раз выше, чем у мертвых.
4. Установлено, что только U_{0-R} живых берез зависит от температуры воздуха.
5. Предложено применять сканирование электрического поля в стволах древесных растений для диагностики их жизненного состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов, В.А. Пьезоэлектрические свойства древесины [Текст] /В.А. Баженов. – М.: Изд-во АН, 1959. – 239 с.
2. Богомолов, Б.Д. Химия древесины и основы химии высокомолекулярных соединений [Текст] /Б.Д. Богомолов. – М.: Лесн. пром-сть, 1973. – 400 с.

3. Электрические поля термического происхождения в природной древесине [Текст] /Н.Ю. Евсикова и др.// Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения (INTERMATIC – 2006): материалы Междунар. науч.-техн. конф. – М.: МИРЭА, 2006. – Ч. 3. – С. 87–89.

4. *Матвеев, Н.Н.* Поляризационные эффекты в кристаллизующихся полимерах [Текст] /Н.Н. Матвеев, В.В. Постников, В.В. Саушкин; под ред. Н.Н. Матвеева. – Воронеж: ВГЛТА, 2000. – 170 с.

5. *Рыжков, О.В.* Стационарные исследования древесной растительности в заповедниках [Текст] /О.В. Рыжков// Почвенный и биотический мониторинг заповедных экосистем. – М., 1996. – С. 63–66.

N.Yu. Evsikova, N.N. Matveev, O.M. Korchagin, N.S. Kamalova, V.Yu. Zapletin

Scanning of Electric Field in Wooden Plant Stems as Method of Exposing Living State

The model of electric field generation in wooden plants stems is offered. The results of measuring the potential difference in radial direction of birch stems are provided. The dependence of character of potential difference change in wood stem on tree living state and environment temperature change is established.

Keywords: potential difference, wooden plant stem, European white birch, temperature change, pulp, lignin.