ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ДЕРЕВА ОТ ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ

А.С. Холманский, Ю.М. Кожевников

Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ)
109456 Москва, 1-й Вешняковский проезд, д. 2
Тел.: (499) 171-19-20. E-mail: allexhol@yandex.ru

Заключение совета рецензентов: 05.09.15 Заключение совета экспертов: 10.09.15 Принято к публикации: 15.09.15

В работе изучено влияние внешних условий (света, температуры) на эффективность генерации электрической энергии гальваническим элементом, образованным из пары металлических электродов, размещенных в дереве и почве. Использовали электроды из железа, нержавеющей стали и меди. Изучили деревья разного возраста Московской и Калужской областей: березу, липу, дуб, лиственницу, сосну, ель. Разность потенциалов между деревом и почвой менялась в диапазоне от 0,1 до 0,7 В в зависимости от вида дерева и материала электрода. Максимальная эффективность генерации электричества в летнее время достигалась в полуденные часы на лиственных деревьях с применением электродов из железа (дерево) и меди (почва). Сделали заключение об ускорении солнечным светом кинетики окислительно-восстановительных реакций в электролите ксилемы с участием металла электрода. Более высокие значения разности потенциалов в лиственных деревьях по сравнению с хвойными связали с более высокими значениями pH и диэлектрической постоянной в пасоке, чем в живице. Полученные результаты полезны для конструирования аккумуляторов электрической энергии деревьев, с помощью которых можно будет заряжать и питать маломощные электронные устройства.

Ключевые слова: деревья, электрохимия, потенциал, гальванический элемент, солнечный свет.

DEPENDENCE OF ELECTRIC POTENTIAL OF TREES FROM ENVIRONMENTAL CONDITIONS

A.S. Holmanskiy, Yu.M. Kozhevnikov

The All-Russian Research Institute for Electrification of Agriculture (VIESH)
2, 1st Veshnyakovskii str., Moscow, 109456, Russia
Tel.: (499) 171-19-20. E-mail: allexhol@ya.ru

Referred: 05.09.15 Expertise: 10.09.15 Accepted: 15.09.15

In this paper we studied the effect of environmental conditions (light, temperature) on the efficiency of electric power generation by galvanic element formed of a pair of metal electrodes placed in the tree and the soil. Electrodes made from iron, stainless steel and copper. Studied trees of different ages Moscow and Kaluga region: birch, linden, oak, larch, pine, spruce. The potential difference between the wood and soil varied between 0.1 and 0.7 V, depending on the wood species and the electrode material. Maximum efficiency of electricity generation in the summer time was achieved at midday on deciduous trees by using electrodes made of iron (wood) and copper (soil). Made the conclusion that the sunlight accelerate the kinetics of redox reactions in the electrolyte xylem with a metal electrode. Higher values of the potential difference in deciduous trees compared to conifers associated with higher values of pH and the dielectric constant in the sap than in turpentine. The results obtained are useful for the construction of electric power trees batteries, by which can be recharged the low power electronic devices.

Keywords: trees, electrochemistry, potential, electrochemical cell, sunlight.

Александр Сергеевич
Холманский
Alexander S.
Holmanskiy

Сведения об авторе: д-р хим. наук, ст. научный сотрудник ВИЭСХ.
Образование: МФТИ (1972).
Область научных интересов: альтернативное мышление.
Публикации: 99.

Information about author: PhD, VIESH.
Education: MPTI (1972).
Research area: alternative thinking.
Publications: 99.

Юрий Александрович
Кожевников
Yury M. Kozhevnikov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, заведующий лабораторией ВИЭСХ.
Образование: ВЗПИ (1983).
Область научных интересов: производство биотоплива.
Публикации: 88.

Information about author: PhD, VIESH.
Education: DPGB (1983).
Research area: production of biofuels.
Publications: 88.

Введение

Между надземной частью растения и почвой регистрируют устойчивую разность потенциалов [1-3], несмотря на то, что растение с поверхностью земли образует эквипотенциальную поверхность. В принципе этот потенциал можно использовать для генерации электрической энергии, что особенно актуально для зарядки маломощной электроники в лесу [4, 5]. Возможности практического использования деревьев в альтернативной энергетике стимулируют исследования механизма биоэлектричества и конструирование электротехнических устройств, аккумулирующих электрохимическую энергию дерева и почвы [6, 7].

В настоящей работе с целью определения оптимальных условий для использования электрохимической энергии деревьев изучили зависимость разности потенциалов между деревом и землей от породы дерева, материала электрода, температуры воздуха и времени суток.

Материалы и методы

Опыты проводили в лесах Московской и Калужской областей. Исследовали следующие деревья: березу, липу, дуб, лиственницу, сосну, ель. Деревья одной породы имели разный возраст. Разность по-

тенциалов (V), ток (I) и температуру измеряли с помощью портативного тестера (MAS838), оснащенного термопарой. В качестве контактных электродов использовали железные гвозди (Fe) длиной 10-20 см, полоски из нержавеющей стали (НЖ) 2×10×150 мм; медную трубку (Cu) диаметром 2 см, толщина стенки 2 мм, длина 30 см. Гвоздь вбивали в дерево на глубину 1,5-2,5 см вплоть до твердых слоев древесины на высоте 70-80 см, а различные электроды в почву погружали на глубину 15-20 см на расстоянии от ствола дерева 20-30 см. Измерения проводили круглые сутки с интервалами 3-4 часа в июне-сентябре 2013-2014 гг.

Результаты

В дерево вбивали электроды двух типов – Fe и НЖ. В почву вводили электроды Fe, НЖ и Cu. Величины V между различными парами электродов для разных пород деревьев приведены в табл. 1. Изменения V липы для различных пар электродов со временем представлены на рис 1, 2. При неизменном положении Fe-электрода в березе более двух суток на части электрода, находящейся в дереве, образовывался слой оксида темного цвета. Значение V березы практически не менялось при варьировании высоты Fe-электрода в дереве и расстояния между березой и Fe-электродом почвы в пределах 10-100 см (табл. 2).

Таблица 1
Разность потенциалов «дерево-почва»
в парах с разными электродами

Potential difference "tree-soil"
in pairs with different electrodes

Дерево (диаметр ствола, см)	Время, ч	V, В		
		Fe-Fe	Fe-Cu	НЖ-Cu
Сосна (10-40)	7-22	0,16-0,37	0,63	0,13
	3	0,26	0,60	-
Лиственница (15-30)	7-22	0,11-0,34	0,63-0,66	0,25
	3	0,29	0,6-0,73	-
Ель (15-25)	7-22	0,12-0,22	0,58	0,11
	3	0,2	0,57	-
Береза (10-30)	7-22	0,18-0,50	0,7-0,72	0,43
Дуб (20-70)	7-22	0,18-0,32	-	-

Таблица 2
Зависимость разности потенциалов и тока
от расстояния между березой и электродом
в почве

Table 2
The dependence of the potential difference
and the current on the distance between birch and
electrode in the soil

L, см	V, В	I, мкА
10	0,37	34
20	0,37	36
30	0,36	31
50	0,36	34
100	0,36	31

При замене Fe-электродов в дереве и земле на НЖ-электроды разность потенциалов была того же знака, но она снижалась от ~0,2 В почти до нуля за время порядка 15 мин. Начальный ток в такой системе был мал (~10 мкА) и падал до нуля за время порядка ~3 секунды. Когда пара электродов Fe-Cu находилась во влажной земле на расстоянии друг от друга 10 см, то V равнялось ~0,4 В, тогда как в дереве величина V была на 0,2-0,3 В выше. У полностью высохших деревьев величина V равнялась нулю. У березового пня двухгодичной давности величина V возрастала в 1,5-2 раза при перемещении Fe-электрода от центра пня к периферийным слоям дерева, расположенным на расстоянии ~2 см от коры, достигая значений, близких к V для живого дерева (~0,3 В).

На электроде, находящемся в дереве, возникал отрицательный потенциал, а на электроде, погруженном в землю, – положительный, при этом вольтметр показывал положительную величину V. Температура ксилемы липы на глубине 2,0-2,5 см днем была на ~5 градусов ниже температуры воздуха и повторяла ее суточный ход (рис. 1).

Обсуждение

Пара электродов «дерево-почва» образует гальванический элемент [8], в котором один электрод находится в электролите ксилемы, а другой – в электролите почвы, эти электролиты разделены полупроницаемой мембраной гидрофобной кутикулы корневой системы дерева. Например, для пары электродов Fe-Cu гальванический элемент: {Fe|сок дерева||влаги почвы|Cu}. Величина V будет зависеть от pH электролитов и электродного потенциала или от электрохимической активности металла [9]. Более активный металл (Fe) в нашем случае будет отрицательным электродом, менее активный (Cu) – положительным. Поток электронов потечет от отрицательного электрода к положительному. Взяв значе-

Рис. 1. Суточные изменения разности потенциалов (V, cV) и температуры воздуха (T, °C) с 14 по 19 июля 2014 г. Дерево липа (Калужская обл.). 1 – температура воздуха; 2 – температура ксилемы; 3 – Fe(дерево) – Cu(почва); 4 – НЖ(дерево) – Cu(почва)

Fig. 1. Daily changes of a potential difference (V, cV) and air temperatures (T, °C) from July 14 to July 19, 2014. Tree linden (Kaluga reg.). 1 – air temperature; 2 – xylem temperature; 3 – Fe (tree) – Cu (soil); 4 – NZh (tree) – Cu (soil)

Рис 2. Суточные изменения разности потенциалов (V) с 14 по 19 июля 2014 года. Дерево липа (Калужская обл.). Электроды Fe(дерево) – Fe(почва)

Fig. 2. Daily changes of a potential difference (V) from July 14 to July 19, 2014. Tree linden (Kaluga reg.). Electrodes of Fe (tree) – Fe (soil)

ния стандартных электродных потенциалов (E) для Fe (-0,44 В) и Cu (+0,34 В), можно вычислить электродвижущую силу (ЭДС) такого элемента:

$$\begin{aligned}\text{ЭДС} &= E(\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}) - E(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}) = \\ &= 0,34 - (-0,44) = 0,78 \text{ В}.\end{aligned}$$

С полученной величиной хорошо согласуются величины V для пары Fe-Cu в табл. 1.

Значения pH сока дерева, содержащего катионы H^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , близки к 6, что незначительно отличается от pH почвы, величина которого для различных почв меняется в диапазоне ~6-8 [2]. Очевидно, из-за того, что пасока березы является более кислым электролитом, чем электролит почвы, величина V возрастает при переносе одного Fe-электрода из почвы в дерево [10]. Наибольшее содержание пасоки и живицы достигается в слоях камбия и заболони (до 80-90 %масс. [11]), поэтому метаболизм этих тканей будет наиболее чувствителен к эффектам поляризации во внешнем электрическом поле. Действительно, максимальная величина V наблюдается при глубине погружения Fe-электрода в дерево, сравнимой с глубиной залегания камбия. Характер зависимости V и I во внешней цепи гальванического элемента от материала электрода и времени позволяет заключить, что в основе механизма генерации V в элементе с электродами из железа лежит процесс образования равновесного двойного слоя электрических зарядов на границе контакта {Fe|электролит} [9]. Положительный слой формируется из гидратированных катионов железа, выходящих из электрода, а отрицательный – из избыточных электронов в электроде.

Жидкие среды дерева и почвы в силу неразрывности их водной фазы составляют единое целое, и скорость распространения фронта ее поляризации будет близка к скорости распространения электрического поля в среде с соответствующей диэлектрической постоянной. В полупроницаемой и поляризованной мембране корневой системы работают активные механизмы транспорта воды и минеральных солей, благодаря которым содержание воды и ионов в соке ксилемы повышается на один-два порядка по сравнению с почвой [12]. Именно поэтому интенсивность процесса гидратации катионов железа и плотность заряда в двойном слое на электроде в дереве оказывается больше, чем на Fe-электроде в почве, что и обуславливает направление тока электронов в элементе. По этой же причине величина V снижается при перемещении Fe-электрода из дерева в почву. Уменьшение равновесной плотности электронов в Fe-электроде в дереве при протекании тока по внешней цепи элемента восполняется выходом и гидратацией новых катионов железа в количестве, достаточном для восстановления зарядового равновесия в двойном слое на обоих электродах.

Окисление поверхности (коррозия) Fe-электрода снижает интенсивность процесса гидратации катио-

нов железа, и плотность зарядов в двойном слое уменьшается, что и приводит к неизбежному снижению величины V со временем (рис. 2). Генерация V в элементе с электродами из нержавеющей стали может идти по такому же механизму, но с участием примесных катионов на поверхности электродов. При этом отрицательных зарядов в электроде практически не образуется, на что и указывает низкий ток в таком элементе и быстрая кинетика его спада. Не исключено также, что потенциал и отрицательный заряд на электроде из нержавеющей стали образуются в процессе разрушения ткани дерева [13].

Из этих данных и того, что значения V и тока в элементе становятся максимальными сразу в момент замыкания цепи и не зависят от длины (сопротивления) «древесного» и «земляного» участков цепи (табл. 2), следует, что в обоих электролитах тока не возникает, но происходит поляризация их жидкой фазы. Для исключения влияния электротонических токов отметим, что их величина в растениях в сотни раз меньше величин I (в корневых волосках – порядка 0,1-0,4 мкА). Кроме того, скорость движения зарядов, отвечающих за эти токи, будет лимитирована скоростью распространения потенциала действия, величина которой у растений составляет 0,08-0,5 см/с [12].

Известно [13], что поверхность земли имеет отрицательный заряд, которому отвечает электрическое поле с вектором напряженности, ортогональным поверхности земли. Его величина составляет в среднем 150 В/м, однако в некоторых местах и при неустойчивых погодных условиях она может возрастать до ~1000 В/м [13]. Как отмечалось выше, поляризация жидкой среды растения во внешнем электрическом поле и ее влияние на метаболические процессы будет тем значимей, чем выше ее диэлектрическая постоянная. У березы ткань камбия насыщена пасокой, являющейся слабым электролитом с диэлектрической постоянной, близкой к воде ($\epsilon \sim 80$). У сосны в поверхностных тканях древесины (камбий, заболонь) жидкая среда включает практически равные количества воды и живицы. Основу живицы составляет скипидар, имеющий $\epsilon \sim 2$. Можно полагать, что средняя величина ϵ жидкой среды камбия хвойных деревьев будет существенно ниже, чем у лиственных. Поэтому поляризация во внешнем электрическом поле и ее влияние на метаболизм у лиственных деревьев (березы, дуба) будет на порядок сильнее, чем у хвойных пород (сосны, ели). Данный вывод согласуется с тем фактом, что величины V у лиственных пород, как правило, выше, чем у хвойных (табл. 1).

Анализ суточного хода V и T (рис. 1) показывает, что максимальная величина V наблюдается в полдень (12 часов), а минимальная – в районе 20-21 часа, тогда как T имеет максимум в районе 14-17 часов, а минимум – в 5-7 часов. Этот результат согласуется с тем, что в полдень фотосинтез, а значит, и кинетика метаболизма в дереве достигают максимума, обеспе-

чивая предельно высокую эффективность окислительно-восстановительных реакций между электролитами и Fe-электродом. Таким образом, эффективность генерации V в большей степени лимитирует солнечный свет, а не температура. Соответственно, вечнозеленые хвойные деревья могут эффективно генерировать электрическую энергию и в зимнее время.

Закключение

Результаты исследований показали, что пара металлических электродов, имеющих разные электрохимические потенциалы, при размещении их в дереве и почве образуют гальванический элемент. Эффективность генерации электрической энергии данным элементом зависит от интенсивности солнечного излучения и имеет большие значения для лиственных деревьев, чем для хвойных.

Список литературы

1. Холманский А.С. Адаптация деревьев к аномальным физическим факторам // Математическая морфология. Электронный математический и медико-биологический журнал. Том 8. Вып. 3. 2009. <http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/N-23-html/holmanskiy/holmanskiy.doc>.
2. Zhibin Hao, Wenbin Li, Jiangming Kan, Liyuan Jiang, Chao Feng, Bioelectricity in standing trees – A Potential Energy for Wireless Sensor Networks // TELKOMNIKA. 2013, Vol. 11, No. 8. P. 4841-4846.
3. Hao Tian, Jiangming Kan, Qing Xu, Chao Zhang, Zihao Jiang, Yangfan Li. A Measurement system of electric signals on standing trees // Sensors & Transducers. 2014. Vol. 162, Issue 1. P. 215-220.
4. Carlton Himes, Eric Carlson, Ryan J. Ricchiuti, David W. Taylor, Brian Otis, Babak A. Parviz. Using plants for directly powering nanoelectronic circuits // Nanotechnology Perceptions. 6 (2010). pp. 29-40.
5. The Roots of Power // http://www.iop.org/activity/groups/subject/env/prize/file_52518.pdf.
6. Dominique Gibert, Jean-Louis Le Mouel, Luc Lambs, Florence Nicollin, Frederic Perrier. Sap flow and daily electrical potential variations in a tree trunk // Plant Science. 2006. 171: 572–584.
7. Christopher J. Love, Shuguang Zhang, Andreas Mershin. Source of sustained voltage difference between the xylem of a potted Ficus benjamina tree and its soil // PLoS ONE. 2008. 3(8): P. 2963.
8. Витер В.Н. Гальванический элемент, ч. 4. // Химия и химики. 2014. № 7. http://chemistry-chemists.Com/N7_2014/ChemistryAndChemists_7_2014 - P8-4. html#3.
9. Шаталов А.Я. Введение в электрохимическую термодинамику. М.: Высшая школа, 1984.
10. Ch. Mamatha, Shija Mathew. A natural battery based on lake water and its soil bank // www.ijevs.com.
11. Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений // www.bonsai.ru/dendro/phcontent.html.
12. Полевой В.В. Физиология растений. М.: Высшая школа, 1989.
13. Гордеев А.М., Шешнев В.Б. Электричество в жизни растений. М.: Наука, 1991.

References

1. Holmanskiy A.S. Adaptaciã derev'ev k anomal'nym fizičeskim faktoram // Matematičeskaã morfologiã. Èlektronnyj matematičeskij i mediko-biologičeskij žurnal. Tom 8. Vyp. 3. 2009. <http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/N-23-html/holmanskiy/holmanskiy.doc>.
2. Zhibin Hao, Wenbin Li, Jiangming Kan, Liyuan Jiang, Chao Feng, Bioelectricity in standing trees – A Potential energy for wireless sensor networks // TELKOMNIKA. 2013, Vol. 11, No. 8. P. 4841-4846.
3. Hao Tian, Jiangming Kan, Qing Xu, Chao Zhang, Zihao Jiang, Yangfan Li. A Measurement system of electric signals on standing trees // Sensors & Transducers. 2014. Vol. 162, Issue 1. P. 215-220.
4. Carlton Himes, Eric Carlson, Ryan J. Ricchiuti, David W. Taylor, Brian Otis, Babak A. Parviz. Using plants for directly powering nanoelectronic circuits // Nanotechnology Perceptions. 6 (2010). pp. 29-40.
5. The Roots of Power // http://www.iop.org/activity/groups/subject/env/prize/file_52518.pdf.
6. Dominique Gibert, Jean-Louis Le Mouel, Luc Lambs, Florence Nicollin, Frederic Perrier. Sap Flow and daily electrical potential variations in a tree trunk // Plant Science. 2006. 171: 572–584.
7. Christopher J. Love, Shuguang Zhang, Andreas Mershin. Source of sustained voltage difference between the xylem of a potted Ficus benjamina tree and its soil // PLoS ONE. 2008. 3(8): R. 2963.
8. Viter V.N. Gal'vaničeskij èlement, č. 4. // Himiã i himiki. 2014. № 7. http://chemistry-chemists.com/N7_2014/ChemistryAndChemists_7_2014-P8-4. html#3.
9. Šatalov A.Â. Vvedenie v èlektrohimičeskuû termodinamiku. M.: Vysšaã škola, 1984.
10. Ch. Mamatha, Shija Mathew. A natural battery based on lake water and its soil bank // www.ijevs.com.
11. Kramer P.D., Kozlovskij T.T. Fiziologiã drevesnyh rastenij // www.bonsai.ru/dendro/phcontent.html.
12. Polevoj V.V. Fiziologiã rastenij. M.: Vysšaã škola, 1989.
13. Gordeev A.M., Šešnev V.B. Èlektričestvo v žizni rastenij. M.: Nauka, 1991.

Транслитерация по ISO 9:1995