

ПРОЦЕСС ВОЗНИКНОВЕНИЯ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ В ТОНКОМ СЛОЕ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ УСТОЙЧИВОМ ПЕРЕПАДЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВДОЛЬ ЕГО ТОЛЩИНЫ

доктор физико-математических наук, профессор **Н. Н. Матвеев**¹

кандидат физико-математических наук, доцент **Н. С. Камалова**¹

кандидат физико-математических наук, доцент **Н. Ю. Евсикова**¹

кандидат физико-математических наук, доцент **В. В. Саушкин**¹

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

В статье предлагается комплексная модель процесса возникновения разности потенциалов в тонком слое древесины с целью рассмотрения целесообразности использования природной древесины в качестве материала для преобразователей тепловой энергии в электрическую. В настоящее время в области естественных перепадов температур в качестве материалов для термопреобразователей энергии применяются полупроводниковые сплавы: CsBiSb, BiTe, PbTe, SiGe. Эти материалы обладают высокими значениями электропроводности и термо-ЭДС. Однако в последнее время все больший интерес вызывают структуры с нерегулярными включениями, обладающие низкой теплопроводностью. Поэтому широко исследуются термоэлектрические свойства систем с гетерограницами (сверхрешётки, системы с квантовыми ямами, проволочками и точками, композиты с нерегулярными включениями нанометрового размера, пористые полупроводниковые конструкции). Возможность использования в указанных целях природных композитов, таких как древесина, пока исследована недостаточно широко, хотя известно, что древесина обладает пьезоэлектрическими и пьезоэлектрическими свойствами, а также имеет низкую теплопроводность. В основе процесса формирования устойчивой разности потенциалов (термо-ЭДС) в возобновляемом природном биокompозите – древесине лежат поляризационные явления: пьезоэлектрический эффект, обусловленный избыточным давлением на кристаллическую целлюлозу со стороны испытывающего тепловое расширение лигнина, и термически индуцированный пьезоэлектрический эффект в кристаллитах целлюлозы. В работе приведены экспериментально полученные зависимости разности потенциалов (термо-ЭДС) от величины перепада температуры и влажности древесины. Исследования позволяют сделать вывод, что абсолютное значение сформированной в древесине при естественном перепаде температуры термо-ЭДС, как и в традиционно используемых для термопреобразователей энергии материалах, прямо пропорционально величине перепада температуры. При этом оно значительно больше и возрастает с увеличением влажности. Таким образом, результаты исследований показывают целесообразность рассмотрения возможности использования древесины для создания новых материалов для термопреобразователей энергии.

Ключевые слова: термопреобразователи энергии, термо-ЭДС, разность потенциалов, перепад температуры, пьезоэлектрический эффект, пьезоэлектрический эффект, кристаллиты целлюлозы.

THE PROCESS OF POTENTIAL DIFFERENCES IN A THIN LAYER OF WOOD WITH A STEADY TEMPERATURE GRADIENT ALONG ITS THICKNESS

DSc in Physics and Mathematics, Professor **N. N. Matveev**¹

PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor **N. S. Kamalova**¹

PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor **N. Yu. Evsikova**¹

PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor **V. V. Saushkin**¹

1 – Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and
Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation

Abstract

The article suggests a comprehensive model of the process of potential differences in a thin layer of wood for the purpose of considering the feasibility of using natural wood as the material for converters of thermal energy into

electrical energy. Currently, in the field of natural changes in temperature as materials for thermal energy semiconductor alloys are applied: CsBiSb, BiTe, PbTe, SiGe. These materials have high values of electrical conductivity and thermo-EMF. Recently, however, a growing interest takes structures with irregular inclusions having low conductivity. Therefore thermoelectric properties of the systems heterogeneity (superlattices, systems with quantum wells, wires and dots, composites with irregular inclusions of nanometric size, the porous semiconductor design) are widely studied. The possibility of use of the natural composites such as wood, is not extensively studied yet, although it is known that wood has pyroelectric and piezoelectric properties and also has low thermal conductivity. The process of formation of stable potential difference (thermo EMF) in renewable natural biocomposite - wood has the basis in the polarization phenomena: the piezoelectric effect caused by excess pressure on crystalline cellulose from experiencing thermal expansion of lignin and thermally induced pyroelectric effect in the crystallites cellulose. The paper presents experimentally obtained dependence of the potential difference (thermo EMF) on the magnitude of changes in temperature and moisture content of wood. The studies allow to conclude that the absolute value in formed wood with natural temperature difference thermo-EMF both in materials traditionally used for thermocouple energy is directly proportional to the temperature difference. It is much larger and increases with increasing humidity. Thus, the results show the feasibility of considering the use of wood to create new materials for thermal energy.

Ключевые слова: thermal energy, thermo-EMF, potential difference, temperature change, pyroelectric effect, piezoelectric effect, crystallites of cellulose.

В настоящее время в мире наблюдается нехватка традиционных ископаемых видов топлива. Кроме того, выброс тепловыми электростанциями огромного количества газов приводит к возникновению парникового эффекта и глобальному изменению климата, что вызывает вполне обоснованную тревогу за ближайшее будущее нашей планеты. С другой стороны, актуальным является вопрос о рекуперации тепловых потерь при отоплении. Поэтому продолжается активный поиск материалов, способных достаточно эффективно преобразовывать тепловую энергию в электрическую. Такие материалы позволят производить принципиально новые источники электричества для космических аппаратов, портативных холодильных агрегатов, электронного, медицинского и научного оборудования. Для повышения эффективности поисков необходимо накопление экспериментальных и теоретических данных, позволяющих более глубоко изучить механизмы возникновения термоэлектричества в материалах самого разного происхождения. Традиционно в качестве материалов для термопреобразователей, работающих в области естественных перепадов температур, используют полупроводниковые сплавы: CsBiSb, BiTe, PbTe, SiGe [1, 2]. Они имеют высокое значение термо-ЭДС и высокую электропроводность. Однако в последнее время все больший интерес вызывают структуры с нерегулярными включениями, обладающие низкой теплопроводностью. Например, в

работах [3, 4, 5, 6, 7] исследовались термоэлектрические свойства систем с гетерограницами (сверхрешётки, системы с квантовыми ямами, проволочками и точками, композиты с нерегулярными включениями нанометрового размера, такие как Bi_2Te_3 / Sb_2Te_3 [8]. Значительное увеличение термо-ЭДС было получено при использовании пористых полупроводниковых конструкций [9]. Таким образом, необходимый для эффективной работы термопреобразователя материал должен обладать тремя противоречивыми свойствами: высокой термо-ЭДС, высокой электропроводностью и низкой теплопроводностью [10, 11, 12, 13, 14, 15]. Кроме того, сравнительно недавно выяснилось, что для преобразования энергии кроме термоэлектрических свойств могут быть использованы пироэлектрические свойства материалов [16, 17], в том числе и кремнийорганических. Необходимо заметить, что все используемые материалы имеют комплексную структуру разного уровня сложности: это преимущественно сплавы, гетероструктуры, пористые композиты. Поэтому целесообразно рассмотреть возможность применения в качестве материалов для термопреобразователей энергии природных композитов, таких как древесина, учитывая ее естественную восполняемость, пироэлектрические и пьезоэлектрические свойства, а также низкую теплопроводность. Таким образом, исследование

термополяризационных свойств древесины становится актуальной задачей в области поиска альтернативных источников энергии. В работе [17] было показано, что такие пористые гетерогенные системы биологического происхождения как древесина в силу своего сложного строения обладают термополяризационными свойствами. Цель настоящей работы – подробно рассмотреть физику процессов возникновения разности потенциалов в древесине, помещенной в неоднородное температурное поле, на основе анализа экспериментальных данных.

Для экспериментального воссоздания естественных перепадов температуры в слое древесины использовалась специальная измерительная ячейка, описание которой приведено в работе [18]. Тонкие слои древесины помещались между массивными медными электродами. Нижний электрод нагревался. Градиент температуры в древесном слое задавался значением скорости нагревания нижнего электрода. Между электродами измерялась разность потенциалов.

На рис. 1 и 2 представлены построенные по экспериментальным данным зависимости, показывающие динамику изменения с течением времени разности потенциалов, возникающей в слоях толщиной $l_0 \sim 500...600$ мкм, вырезанных из древесины березы влажностью 8 % и 40 % вдоль волокон, при двух разных значениях градиента температуры.

Приведенные диаграммы наглядно демонстрируют, что в неоднородном температурном поле с перепадом температуры ΔT в пористом биокомпозите – древесине возникает пропорциональная ΔT разность потенциалов:

$$U = K_{\alpha} \Delta T, \quad (1)$$

где K_{α} – коэффициент пропорциональности, характеризующий термополяризационные свойства композита. Кроме того, эта разность потенциалов возрастает с увеличением влажности.

Процесс возникновения разности потенциалов в тонком слое древесины при естественном перепаде вдоль толщины носит комплексный характер. Если в вербальной модели представить натуральную древесину сложным полимерным композитом, основными компонентами которого являются частично кристаллическая целлюлоза и аморфный лигнин, имеющий нерегулярную структуру (смотрите, например, работу [19] и литературу к ней), то с учетом физических свойств

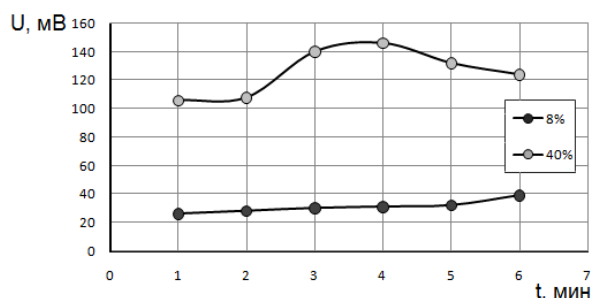


Рис. 1. Результаты экспериментального исследования изменения разности потенциалов в образцах различной влажности (8 % и 40 %) с течением времени при скорости нагревания нижнего электрода $4,17 \text{ К} \cdot \text{мин}^{-1}$

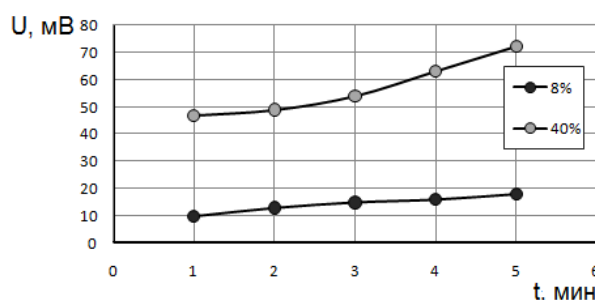


Рис. 2. Результаты экспериментального исследования изменения разности потенциалов в образцах различной влажности (8% и 40%) с течением времени при скорости нагревания нижнего электрода $1,43 \text{ К} \cdot \text{мин}^{-1}$

лигнина, позволяющих относить его к аморфным высокоэластичным веществам, коэффициент теплового расширения которых значительно превышает коэффициент теплового расширения кристалла целлюлозы легко предположить, что в рассматриваемых условиях лигнин испытывает неравномерное расширение или сжатие и оказывает давление на кристаллиты целлюлозы. Кристаллическая целлюлоза обладает пьезоэлектрическими свойствами, кроме того, три из четырех модификаций ее кристалла принадлежат к пироэлектрическому классу [19]. Таким образом, в основе процесса формирования термо-ЭДС в древесине лежат поляризационные явления: термически индуцированный пироэлектрический эффект в кристаллитах целлюлозы и пьезоэлектрический эффект, обусловленный избыточным давлением на кристаллическую целлюлозу со стороны испытывающего тепловое расширение лигнина [17].

В первом приближении напряжение, возникающее в лигнине при перепаде температуры вдоль толщины слоя dT в направлении неравномерности,

равно $\sigma = -c_L \alpha dT$ (здесь α – коэффициент теплового расширения лигнина, c_L – коэффициент Юнга для лигнина). В силу теплового расширения лигнина кристалл целлюлозы в древесине упруго деформируется. Величина относительной деформации кристалла целлюлозы при упругой деформации согласно закону Гука равна $\varepsilon_{kl}^C = -\sigma/c_{kl}$, где c_{kl} – модуль Юнга целлюлозы. Учитывая выражение для напряжения со стороны аморфного лигнина, получим, что $\varepsilon_{kl}^C = c_L/c_{kl} \alpha dT = \mu_{kl} \alpha dT$. Тогда суммарную поляризованность кристаллитов целлюлозы можно определить как

$$P_{i\sigma} = - \int_{T_0}^{T_0+\Delta T} d_{ijk} c_{kjml} \mu_{ml} \alpha dT + \int_{T_0}^{T_0+\Delta T} \gamma_i l_0 dT.$$

Здесь γ_i – пирозлектрический коэффициент целлюлозы,

ε_{ij} – тензор диэлектрической проницаемости,

d_{ijk} – тензор пьезоэлектрических модулей,

$\sigma_{jk}^C = c_{ijkl} \varepsilon_{kl}^C$ – механические напряжения, возникающие в древесине при малом изменении температуры dT . Поскольку лигнин в силу биологического происхождения слабо изучен экспериментально, то на данном этапе исследований для оценки поляризованности целесообразно использовать соотношение:

$$P_i = - \int_{T_0}^{T_0+\Delta T} d_{RcR} \mu_R \alpha dT + \int_{T_0}^{T_0+\Delta T} \gamma_R l_0 dT, \quad (2)$$

где $\varepsilon_R, \gamma_R, d_{RcR}, c_R$ – экспериментально полученные максимальные значения составляющих тензоров диэлектрической проницаемости, пирозлектрического коэффициента, пьезоэлектрических модулей и модуля Юнга для древесины в радиальном направлении.

С учетом того факта, что при стационарном потоке зависимость $\varepsilon_R, \gamma_R, d_{RcR}, c_R$ от температуры можно считать незначительной, выражение (2) можно переписать в виде:

$$P_{i\sigma} = \Gamma_\alpha \Delta T. \quad (3)$$

Здесь $\Gamma_\alpha = -d_{RcR} \mu_R \alpha + \gamma_R$. Соотношение (3) позволяет получить оценочное выражение для напряженности электрического поля в слое, вызванное поляризацией в кристаллитах целлюлозы в температурном поле с величиной неоднородности температуры ΔT :

$$E = \Gamma_\alpha \frac{\Delta T}{\varepsilon_0 \varepsilon_R}. \quad (4)$$

Для более полной оценки суммарной поляризованности необходимо также учесть изменение ориентационной поляризованности ΔP_{in} в боковых полярных группах макромолекул аморфной части целлюлозы в возникающем электрическом поле (4). Изменение ориентационной поляризованности ΔP_{in} образца древесины при постоянном перепаде температуры ΔT в выделенном направлении x вдоль толщины слоя в среднем прямо пропорционально изменению числа частично свободных боковых групп некристаллической части макромолекул целлюлозы ΔN ($\Delta P_{in} = p_i \Delta N$, где p_i – усредненный дипольный момент боковой группы некристаллической части макромолекул целлюлозы). Согласно статистическому закону Больцмана, описывающему распределение частиц по энергиям во внешнем электрическом поле в условиях термодинамического равновесия, зависимость числа частиц от угла φ ориентации к внешнему полю в аморфной целлюлозе:

$$N_\varphi = N_0 \exp\left(-\frac{p_i E \cos \varphi}{kT_0}\right). \quad (5)$$

Следовательно, с учетом (4) и того факта, что $p_i E \cos \varphi \ll kT_0$, для суммарного изменения ΔP_{in} можно получить оценочное соотношение:

$$\Delta P_{in} = \Gamma_\alpha \chi \Delta T, \quad (6)$$

где $\chi = \frac{N_0 p_i^2}{3k_B T_0}$ зависит от температуры окружающей среды T_0 и дипольного момента боковых групп. Таким образом, отклик высокомолекулярного биокомпозита без учета влажности на постоянный перепад температуры в нем носит комплексный характер, и поляризованность образца P_i определяется как сумма слагаемых (3) и (6):

$$P_i = \Gamma_\alpha (1 + \chi) \Delta T. \quad (7)$$

На основании (7) в приближении плоского конденсатора получаем соотношение для оценки разности потенциалов, возникающей в сухом образце древесины при перепаде температуры ΔT :

$$U_i = K_\alpha \Delta T, \quad (8)$$

где $K_\alpha = l_0 (\gamma_R - d_{RcR} \mu_R \alpha) (1 + \chi) / \varepsilon_0 \varepsilon_i$ – коэффициент, зависящий от поляризационных свойств древесины;

ε_0 и ε_i – электрическая постоянная и диэлектрическая проницаемость древесины в выделенном направлении

нии. Соотношение (8) и особенности надмолекулярной структуры целлюлозы в древесине показывают, что основной вклад в K_α будет вносить пьезоэлектрическая составляющая ($d_R c_R \mu_R \alpha$), величина которой зависит от характеристик нерегулярного лигнина ($\mu_{ml}; \alpha$), которые в свою очередь определяются особенностями биологического происхождения материала.

В рамках достаточно грубой оценки, например, для древесины березы влажностью до 8% по известным данным ($d_R \approx 0,47 \cdot 10^{-8}$ Кл/м; $\mu_R \approx 0,3$; $\varepsilon_i \approx 1,91$; $c_R \approx 3,7 \cdot 10^3$ Па; $\alpha \approx 5,41 \cdot 10^{-6}$ м/К; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $l_0 = 800$ мкм) [18] получим, что на пьезоэлектрическую составляющую приходится более половины (67 %) коэффициента, рассчитанного по данным эксперимента.

Оценка поляризованности слоев древесины будет неполной без учета вклада P_σ дипольной ориентационной поляризации молекул воды в порах древесины. С учетом влажности древесины σ запишем выражение для определения числа молекул воды N в порах гетероструктуры объема V в виде:

$$N = m_0 N_A \sigma / (\mu_0 (1 - \sigma)), \quad (9)$$

где μ_0 – молярная масса воды,

m_0 – масса сухой древесины,

N_A – число Авогадро.

Молекулы воды во внешнем электрическом поле напряженностью $dE = dP_i / \varepsilon_0 \varepsilon_i$ поляризуются. В случае дипольной ориентационной поляризации суммарный дипольный момент молекул воды в образце можно оценить как:

$$P_\sigma = n p^2 P_i / (3 k_B T \varepsilon_i), \quad (10)$$

где $n = N/V$ – концентрация воды в слое,

p – дипольный момент молекулы воды,

k_B – постоянная Больцмана. Перепишем выражение (2), учитывая (9) и (10):

$$P_\sigma = P_i + P_\sigma = P_i [1 + \sigma \chi / (\varepsilon_i (1 - \sigma))], \quad (11)$$

где $\chi = m_0 p^2 N_A / (3 \mu_0 V k_B T)$.

Из (11) получаем соотношение для оценки разности потенциалов, возникающей в образце древесины влажностью σ при температурном перепаде величиной ΔT :

$$U_i = K_\alpha \Delta T [1 + \sigma \chi / (\varepsilon_i (1 - \sigma))]. \quad (12)$$

Соотношение (12) подтверждает полученный экспериментальный результат, приведенный на рис. 1 и 2: при возрастании влажности слоя, например, от 8 % до 40 % разность потенциалов может увеличиваться в 1,5 раза при одинаковом перепаде температур и состоянии надмолекулярной структуры целлюлозы.

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. В основе процесса формирования устойчивой разности потенциалов (термо-ЭДС) в возобновляемом природном биокомпозите (древесине) лежат поляризационные явления: пьезоэлектрический эффект, обусловленный избыточным давлением на кристаллическую целлюлозу со стороны испытывающего тепловое расширение лигнина, и термически индуцированный пьезоэлектрический эффект в кристаллитах целлюлозы. Поэтому величина термо-ЭДС несет информацию об особенностях взаимовлияния составляющих древесины.

2. Величина возникающей в древесине при естественном перепаде температуры термо-ЭДС прямо пропорциональна величине перепада температуры. Это аналогично термоэлектрическим явлениям в металлах, полупроводниках или CVD-графене. В образцах влажностью 40 % в диапазоне температур от 293-319 К она составляет в среднем 5264,8 мкВ/К, для сравнения в диапазоне вблизи $T=300$ К для CVD-графена эта величина согласно исследованиям составляет около 10 мкВ/К [20], а для металлов не превышает 100 мкВ/К. Однако в отличие от других материалов основной вклад (до 67 %) согласно экспериментальным данным в коэффициент пропорциональности K_α вносит пьезоэлектрическая составляющая.

3. При возрастании влажности образца с 8 % до 40 % термо-ЭДС возрастает в примерно в 1,5 раза, что совпадает с оценками по выражению (12). Этот результат позволяет предположить, что электропроводность древесины можно увеличивать заполнением пор электролитическим раствором или проводящим материалом в виде тонких проволок или квантовых структур.

Таким образом, результаты исследований показывают целесообразность рассмотрения возможности использования древесины для создания основы материалов для термопреобразователей энергии.

Работа выполнена при поддержке университетского гранта «Развитие инновационных идей «Точки роста 2017»».

Библиографический список

1. Патрушева, Т. Н. Термоэлектрическая добротность в низкоразмерной полупроводниковой среде [Текст] / Т. Н. Патрушева, С. А. Подорожняк, Г. Н. Шелованова // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2013. – № 6. – С. 657-664.
2. Применение нанотехнологий для создания высокоэффективных термоэлектрических материалов [Текст] / В. Н. Абрютин, С. В. Нестеров, В. А. Романко, А. И. Холопкин // Наноиндустрия. – 2010. – № 1. – С. 24-26.
3. PbTe-based quantum-dot thermoelectric materials with high ZT [Text] / T. C. Harman [et al.] // IEEE Proceedings of 18th International Conference on Thermoelectrics, ed. Ehrlich, A., Piscataway, NJ. – 1999. – P. 280-284.
4. Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit. [Text] / R. Venkatasubramanian [et al.] // Nature. – 2001. – 413. – P. 597-602.
5. Shakouri, A. Design and characterization of thin film microcoolers [Text] / A. Shakouri, J. E. Bowers // Appl. Phys. Lett. – 1997. – 71. – P. 1234-1236.
6. Broido, D. A. Thermoelectric figure of merit of quantum wire superlattices [Text] / D. A. Broido, T. L. Reinecke // Appl. Phys. Lett. – 1995. – 67 (1). – P. 100-102.
7. Hicks, L. D. Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit. [Text] / L. D. Hicks, M. S. Dresselhaus // Phys. Rev. B. – 1993. – 47 (19). – P. 12727-12731.
8. Hicks, L. D. Thermoelectric figure of merit of a one dimensional Conductor [Text] / L. D. Hicks, M. S. Dresselhaus // Phys. Rev. B. – 1993. – 47 (24). – P. 16631-16634.
9. Silicon nanowires as efficient thermoelectric materials. – [Text] / Akram I. Boukai [et al.] // Nature. – 2008. – 451. – P. 168-171.
10. Theoretical estimation of characteristics of thermoelectric materials made of nanopowders [Text] / A. I. Holopkin, V. N. Abrutin, S. B. Nesterov, V. A. Romanko // Proceeding of The 5-th European Conference on Thermoelectrics (ECT 2007), Odessa, Ukraine, September 10-12, 2007. – P. 229-233.
11. Model of thermoelectric material composed of nanoparticles with quantum-point contacts [Text] / A. I. Holopkin, V. N. Abrutin, S. B. Nesterov, V. A. Romanko // Proceedings of 6th European Conference on Thermoelectrics, July 2-4, 2008, Paris, France. – P. P1-05-1.
12. Miller, Karl-Heinz. Thermoelectric properties of an array of molecular junctions [Text] / Karl-Heinz Miller // Proceedings of 6th European Conference on Thermoelectrics, July 2-4, 2008, Paris, France. – P. O-07-1 – O-07-1.
13. On the effective kinetic coefficients of thermoelectric nanocomposites [Text] / L. P. Bulat [et al.] // Proceedings of 6th European Conference on Thermoelectrics, July 2-4, 2008, Paris, France. – P. I-03-1 – I-03-6.
14. High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys [Text] / B. Poudel [et al.] // Science. – 2 May 2008. – Vol. 320. – P. 634-638.
15. Influence of structural inhomogeneities on the formation of the pyroelectric phase in polymers [Text] / N. N. Matveev, N. S. Kamalova, N. Y. Evsikova, O. Farberovich // Physics of the Solid State. – 2015. – Vol. 57. – № 6. – P. 1148-1150.
16. Thermopolarization effect in the cavity structures of heterogeneous systems [Text] / V. I. Lisitsyn [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2013. – Vol. 77. – № 8. – P. 1071-1072.
17. Матвеев, Н. Н. Поляризационные эффекты в кристаллизующихся полимерах [Текст] / Н. Н. Матвеев, В. В. Постников, В. В. Саушкин. – Воронеж, 2000. – 170 с.
18. Физические величины [Текст] : справ. / под ред. И. С. Григорьева и Е. З. Михайлова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
19. Богомолов, Б. Д. Химия древесины и основы химии высокомолекулярных соединений [Текст] / Б. Д. Богомолов. – М. : Химия, 1973. – 400 с.

References

1. Patrusheva T. N. Podorozhnyak S. A. SHelovanova G. N. *Termoehlektricheskaya dobrotnost v nizkorazmernoj poluprovodnikovoj srede*. [Thermoelectric Q of a low-dimensional semiconductor medium] 2013. 6, pp. 657-664 (in Russian).
2. Abryutin V. N. Nesterov S. V. Romanko V. A. Holopkin A I *Primenenie nanotekhnologii dlya sozdaniya vysokoeffektivnyh termoehlektricheskikh materialov* [Application of nanotechnology to create high-efficiency thermoelectric materials] 2010, 1, pp. 24-26 (in Russian).

3. Harman T.C., Taylor P.J., Spears D.L. et al. PbTe-based quantum-dot thermoelectric materials with high ZT. IEEE Proceedings of 18th International Conference on Thermoelectrics, (ed. Ehrlich, A.), Piscataway, NJ, 1999, pp. 280–284.
4. Venkatasubramanian R., Siivola E., Colpitts T. et al. Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit. *Nature*, 2001, 413, pp. 597–602.
5. Shakouri A, Bowers J.E. Design and characterization of thin film microcoolers. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 71, pp. 1234–1236.
6. Broido D.A., Reinecke T.L. Thermoelectric figure of merit of quantum wire superlattices. – *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 67 (1), pp. 100–102.
7. Hicks L.D, Dresselhaus M.S. Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit. *Phys. Rev. B*, 1993, 47 (19), pp. 12727–12731.
8. Hicks L.D, Dresselhaus M.S. Thermoelectric figure of merit of a one dimensional Conductor. *Phys. Rev. B*, 1993, 47 (24), pp. 16631–16634.
9. Boukai Akram I., Bunimovich Yuri, Tahir-Kheli Jamil et al. Silicon nanowires as efficient thermoelectric materials. *Nature* 451, pp. 168–171 (10 January 2008).
10. Holopkin A.I., Abrutin V.N., Nesterov S.B., Romanko V.A. Theoretical estimation of characteristics of thermoelectric materials made of nanopowders. Proceeding of The 5-th European Conference on Thermoelectrics (ECT 2007), Odessa, Ukraine, September 10-12, 2007, pp. 229–233.
11. Holopkin A.I., Abrutin V.N., Nesterov S.B., Romanko V.A. Model of thermoelectric material composed of nanoparticles with quantum-point contacts. Proceedings of 6th European Conference on Thermoelectrics, July 2-4, 2008, Paris France, pp. P1-05-1.
12. Miller Karl-Heinz. Thermoelectric properties of an array of molecular junctions. – Proceedings of 6th European Conference on Thermoelectrics, July 2-4, 2008, Paris France, pp. O-07-1 – O-07-1.
13. Bulat L.P. et al. On the effective kinetic coefficients of thermoelectric nanocomposites – Proceedings of 6th European Conference on Thermoelectrics, July 2-4, 2008, Paris France, pp. I-03-1 – I-03-6.
14. Poudel B. et al. High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys. – *Science*, 2 May 2008, Vol. 320, pp. 634–638.
15. Matveev N.N., Kamalova N.S., Evsikova N.Y., Farberovich O. Influence of structural inhomogeneities on the formation of the pyroelectric phase in polymers. *Physics of the Solid State*, 2015, Vol. 57, no. 6, p.1148-1150.
16. Lisitsyn V.I. etc. Thermopolarization effect in the cavity structures of heterogeneous systems // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2013, Vol. 77, no. 8, pp. 1071-1072.
17. Matveev N. N. Postnikov V. V. Saushkin V. V. *Polyarizacionnyye ehffekty v kristallizuyushchihysya polimerah* [Polarization effects in crystallizable polymers] Voronezh, 2000, 170 p. (in Russian).
18. *Fizicheskie velichiny Spravochnik* [Physical quantities. Directory] 1991, 1232 p. (in Russian).
19. Bogomolov B D *Himiya drevesiny i osnovy himii vysokomolekulyarnyh soedinenij* [Chemistry of wood and the basis of chemistry of high-molecular compounds.] Moscow, 1973, 400 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Матвеев Николай Николаевич – заведующий кафедрой общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», доктор физико-математических наук, профессор, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: nmtv@vglta.vrn.ru.

Камалова Нина Сергеевна – доцент кафедры общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат физико-математических наук, доцент, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: rc@icmail.ru.

Евсикова Наталья Юрьевна – доцент кафедры общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат физико-математических наук, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: natalyaevsikova@mail.ru.

Саушкин Виктор Васильевич – доцент кафедры общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кандидат физико-математических наук, доцент, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: vvs5@yandex.ru.

Information about Authors

Matveev Nikolay Nikolaevich – Head of the department of General and Applied Physics, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», DSc in Physical and Mathematical Sciences, Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: nmtv@vglta.vrn.ru.

Kamalova Nina Sergeevna – Associate Professor of the Department of General and Applied Physics, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: rc@icmail.ru.

Evsikova Natalya Yurievna – Associate Professor of the Department of General and Applied Physics, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Ph.D. in Physics and Mathematics, Voronezh, Russian Federation; e-mail: natalyaevsikova@mail.ru.

Saushkin Viktor Vasilevich – Associate Professor of the Department of General and Applied Physics, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: vvs5@yandex.ru.

DOI: 10.12737/article_5967e8e01143e9.03067340

УДК631.481

ЛИТОГЕННАЯ ОСНОВА ПРОДУКТИВНОСТИ ВОРОНЕЖСКОЙ НАГОРНОЙ ДУБРАВЫ

кандидат биологических наук, доцент **Г. А. Одноралов**¹

кандидат биологических наук, доцент **Е. Н. Тихонова**¹

кандидат сельскохозяйственных наук **О. В. Трегубов**¹

кандидат сельскохозяйственных наук **И. В. Голядкина**¹

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация

Воронежская нагорная дубрава – жемчужина в лесном кольце, окружающем наш город. Расположена она на природном памятнике, оставленного нашему краю ледником в виде особой формы рельефа, явившегося основой Дон-Воронежского водораздела. В работе приводится описание литологического строения этого объекта, сложенного песками средне- и верхнечетвертичного времени, перекрытыми накоплениями глин, образованных в результате потепления климата в межледниковье. Чередующиеся во времени отложения и меняющиеся климатические условия в голоцене способствовали развитию эрозионно-аккумулятивных циклов, приведших к образованию ложбин стока, балок, оползней, которые разделили оз на ряд увалов, дренировали территорию, изменили глубину залегания под песками глин, а местами вывели их на поверхность. Усилившиеся миграционные потоки сносили глинистые суспензии по склонам, которые осаждались в толще песков в виде ортандов и тонких прослоек, тем самым, увеличивая трофность песков. В результате в толще песков, содержащих не более 2,0 % физической глины, появились, хоть и в малых количествах, вторичные силикаты, улучшая типы условий местопроизрастания. В работе приводятся данные минерального состава песчаных фракций, слагающих основную часть лесных ландшафтов нагорной дубравы. Выявлено, что наибольшее распространение из минералов тяжелой фракции получили минералы устойчивые к гипергенезу. Из непрозрачных – ильменит, из прозрачных – минералы ставролитов- дистено- рутиловых ассоциаций, и далее турмалин, силлимонит и гранат. Неустойчивые к выветриванию амфиболы и эпидот встречаются в незначительных количествах, и, следовательно, повлиять на лесорастительный потенциал они не могут. Легкая фракция практически на 100 % представлена кварцем. Коэффициент минерального богатства составляет 0,19-0,20 %, или 1,9-2,0 кг/т песка. В таких условиях затруднено произрастание в пределах нагорной дубравы, даже бора свежего травяного и, поэтому, формирование суборей, судубрав и дубрав на флювиогляциальных песках сопряжено с наличием вторичных глинистых минералов.

Ключевые слова: ландшафт, гранулометрический состав, нагорная дубрава, геохимический ландшафт, почвенно-литологическое строение, минеральный состав.