

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/3>

УДК 630 + 53.087.92:538.956



## Разность потенциалов в стволах березы повислой (*Betula pendula* Roth): особенности процессов релаксации при изменении температуры окружающей среды

Николай Н. Матвеев<sup>1</sup>, [nmtv@vglta.vrn.ru](mailto:nmtv@vglta.vrn.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9195-9580>

Нина С. Камалова<sup>1</sup>, [rcamel@yandex.ru](mailto:rcamel@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8293-8593>

Виктор И. Лисицын<sup>1</sup> , [viktor-lisicyn@yandex.ru](mailto:viktor-lisicyn@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>

Наталья Ю. Евсикова<sup>1</sup>, [evsikovany\\_phlt@vgltu.ru](mailto:evsikovany_phlt@vgltu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5288-0140>

Хоай Тхыонг Нгуен<sup>2</sup>, [nguyenthuongfee@iuh.edu.vn](mailto:nguyenthuongfee@iuh.edu.vn), <https://orcid.org/0000-0003-1290-5221>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

<sup>2</sup>Промышленный университет Хошимина, Нгуен Ван Бао 12, г. Хошимин, 700000, Вьетнам

Суточная динамика разности потенциалов, возникающей в древесине ствола березы повислой (*Betula pendula* Roth) при перепадах температуры окружающей среды дает возможность моделирования динамики процессов перераспределения ионов солей в порах. Анализ результатов измерений разности потенциалов в древесине ствола модельного дерева показал, что ее динамика носит релаксационный характер и стремится к некоторому стационарному значению. На базе данных натуральных измерений разности потенциалов в рамках классической электродинамики построена формализованная модель динамики относительной разности потенциалов, содержащая три параметра. В результате вычислительного эксперимента, использующего оптимизационную процедуру на основе критерия Нэша-Сатклиффа, рассчитаны параметры вызванного изменением температуры окружающей среды релаксационного процесса формирования вдоль ствола березы устойчивой разности потенциалов. Выявлено, что динамическое равновесие потоков перераспределения зарядов определяется факторами стимулирующих и стабилизирующих процессов внутри стволов древесных растений. Показано, что грамотное сочетание результатов мониторинга разности потенциалов в стволах деревьев и вычислительного эксперимента позволит сформировать обширную базу параметров процессов формирования устойчивого динамического равновесия потоков ионов солей в них в зависимости от особенностей произрастания, суточных и сезонных изменений температуры окружающей среды и состава почвы. Исследование изменения состояния деревьев вследствие отклика на воздействие различных факторов окружающей среды дает возможность расширить спектр инструментов для систем прогнозирования возникновения в лесных экосистемах катастрофических ситуаций.

**Ключевые слова:** разность потенциалов, береза повислая, *Betula pendula* Roth, флуктуации температуры окружающей среды, формализованное моделирование, потоки растворов солей.

**Финансирование:** исследование проведено в рамках работы по теме «Калибровка цифрового устройства по определению разности потенциалов в стволах деревьев», поддержанной локальным грантом ФГБОУ ВО ВГЛТУ.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи, членов Научно-технического Совета ФГБОУ ВО ВГЛТУ и лично проректора по науке и инновациям профессора С.С. Морковину за поддержку исследований.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


**Для цитирования:** Разность потенциалов в стволах березы повислой (*Betula pendula* Roth): особенности процессов релаксации при изменении температуры окружающей среды / Н. Н. Матвеев, Н. С. Камалова, В. И. Лисицын, Н. Ю. Евсикова, Хоай Тхыонг Нгуен // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 30–40. – Библиогр.: с. 36–39 (23 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/3>.


*Поступила* 18.08.2023. *Пересмотрена* 30.10.2023. *Принята* 13.11.2023. *Опубликована онлайн* 30.11.2023.


Article

### Potential difference in trunks of silver birch (*Betula pendula* Roth): features of relaxation processes at changes in ambient temperature

Nikolai N. Matveev<sup>1</sup>, [nmtv@vglta.vrn.ru](mailto:nmtv@vglta.vrn.ru),  <https://orcid.org/0000-0001-9195-9580>

Nina S. Kamalova<sup>1</sup>, [rcamel@yandex.ru](mailto:rcamel@yandex.ru),  <https://orcid.org/0000-0001-8293-8593>

Viktor I. Lisitsyn<sup>1</sup> ✉, [viktor-lisicyn@yandex.ru](mailto:viktor-lisicyn@yandex.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>

Natalya Yu. Evsikova<sup>1</sup>, [evsikovany\\_phlt@vgltu.ru](mailto:evsikovany_phlt@vgltu.ru),  <https://orcid.org/0000-0001-5288-0140>

Hoai Thuong Nguyen<sup>2</sup>, [nguyenthuongfee@iuh.edu.vn](mailto:nguyenthuongfee@iuh.edu.vn),  <https://orcid.org/0000-0003-1290-5221>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation

<sup>2</sup>Industrial University of Ho Chi Minh City, Nguyen Van Bao 12, Ho Chi Minh City, 700000, Vietnam

#### Abstract

The daily dynamics of the potential difference arising in the wood of the trunk of the hanging birch (*Betula pendula* Roth) at ambient temperature changes makes it possible to simulate the dynamics of the processes of redistribution of salt ions in the pores. An analysis of the results of measuring the potential difference in the wood of the model tree trunk showed that its dynamics is of a relaxation nature and tends to a certain stationary value. On the basis of the data of full-scale measurements of the potential difference in the framework of classical electrodynamics, a formalized model of the dynamics of the relative potential difference was constructed, containing three parameters. As a result of a computational experiment using an optimization procedure based on the Nash-Sutcliffe criterion, the parameters of the relaxation process of formation of a stable potential difference along the birch trunk caused by a change in the ambient temperature were calculated. It was revealed that the dynamic balance of the charge redistribution flows is determined by the factors of stimulating and stabilizing processes inside the trunks of woody plants. It is shown that a competent combination of the results of monitoring the potential difference in tree trunks and a computational experiment will make it possible to form an extensive database of parameters for the processes of formation of a stable dynamic equilibrium of salt ion fluxes in them, depending on the characteristics of growth, daily and seasonal changes in ambient temperature and soil composition. The study of changes in the state of trees due to the response to the impact of various environmental factors makes it possible to expand the range of tools for predicting the occurrence of catastrophic situations in forest ecosystems.

**Keywords:** *potential difference, Betula pendula* Roth, *ambient temperature fluctuations, formalized modeling, salt solution currents.*

**Funding:** the research was carried out as part of the work on the topic “Calibration of a digital device for determining the potential difference in tree trunks” supported by a local grant from the FSBEI HE VSUFT.

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to the peer review and members of the Scientific and Technical Council of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov and personally the Vice-Rector for Science and Innovations Prof. S.S. Morkovina for the support of research.

**Conflict of interest:** the authors declares no conflict of interest.

**For citation:** Matveev N. N., Kamalova N. S., Lisitsyn V. I., Evsikova N. Yu., Hoai Thuong Nguyen (2023). Potential difference in trunks of silver birch (*Betula pendula* Roth): features of relaxation processes at changes in ambient temperature. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 30-40 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/3>.

**Received** 18.08.2023. **Revised** 30.10.2023. **Accepted** 13.11.2023. **Published online** 30.11.2023.

### Введение

Необходимость разработки имеющих контролируемую точность технологий неразрушающего мониторинга состояния таких сложных самоорганизующихся систем, как лесные массивы, стимулирует исследование физических процессов в стволах деревьев при изменении физических факторов окружающей среды (температуры и влажности). Отсутствие таких методов – одна из причин сложностей, возникающих при разработке систем прогнозирования пожарной опасности или экологических катастрофических ситуаций, а также систем контроля процессов лесовосстановления, факторного анализа формирования устойчивого состояния лесного массива, как единой сложной системы.

В настоящее время для наблюдения за состоянием сложных биосистем (в частности, лесных массивов) используются комплексы, измеряющие температуру и влажность окружающей среды [1-3]. Для мониторинга водного стресса в лесах применяются методы дистанционного зондирования [4]. При наблюдении за растительностью принцип дистанционного зондирования предполагает использование датчиков для измерения различных длин волн электромагнитного излучения, излучаемого или отражаемого растениями и окружающей их средой, поскольку здоровая растительность характерным образом отражает и поглощает различные длины волн, что может быть обнаружено с помощью оптических приборов [5]. Существуют методики комплексной оценки состояния лесных массивов, комбинирующие методы наземного и дистанционного обследования [6,7]. Таким образом, мониторинг осуществляется на основе косвенных наблюдений, что значительно снижает эффектив-

ность систем прогнозирования катастрофических ситуаций. Развитие цифровых технологий позволяет разрабатывать электроизмерительные приборы (датчики) для определения изменения состояния древесных растений (основных составляющих лесных массивов) с контролируемой точностью [8,9]. Например, для определения изменения влажности или концентрации электролитов в древесной ткани предлагается применять томографию удельного электрического сопротивления [10,11]. В обзоре [12] показано применение метода измерения удельного сопротивления с использованием кольцевой матрицы игольчатых электродов для визуализации внутренних электрических структур стволов живых стоячих деревьев. Анализ результатов измерения электрического сопротивления для изучения растительных тканей описывается в работе [13]. В статье [14] приводится метод определения относительной жизненной силы деревьев, основанный на интерпретации образцов электрического сопротивления, полученных с помощью шигометра – измерителя импульсного тока. Эти методики рассматривают древесину ствола как проводник с неоднородной проводимостью и основаны на корреляции между влажностью и сопротивлением. С другой стороны, активно разрабатываются методы анализа отклика древесных растений на воздействие факторов окружающей среды по измерению непосредственно внеклеточной разности потенциалов. Например, измерение разности потенциалов между корнями и черешком листа предлагается применять для мониторинга физиологических реакций деревьев на содержание влаги в почве [15]. Суточные колебания распределения потенциала в стволе дерева, летом

связанные также с сокодвижением, изучались в работе [16].

Сравнительно недавно выяснилось, что при перепаде температуры окружающей среды в древесине стволов деревьев формируется разность потенциалов, величина которой зависит от их жизненного состояния и влажности [17-19]. Таким образом, измерение разности потенциалов в стволах можно использовать для неразрушающего контроля состояния деревьев.

Целью настоящей работы является формирование концепции моделирования стимулированных изменением температуры окружающей среды потоков ионов солей в порах древесины вдоль стволов древесных растений на основе фундаментальных физических законов. Решаемая задача – разработка метода формализованного моделирования алгоритма определения основных параметров динамики процесса формирования вдоль ствола дерева стационарной разности потенциалов, характеризующей его устойчивое состояние.

#### Материалы и методы

В качестве модельного было выбрано здоровое дерево березы повислой (*Betula pendula* Roth.) возрастом 55 лет, произрастающее в порослевой дубраве Учебно-опытного лесхоза ВГЛТУ. В течение трех суток в дневные часы с 8:30 до 20:00 измерялись значения температуры окружающей среды и разности потенциалов вдоль ствола между точками, расположенными на высоте 1.3 м и 3 м от поверхности земли.

Для измерения использовался портативный цифровой прибор – мультиметр МУ 62. Стабильные показания прибора обеспечивались путем вживления на выбранных высотах в древесину на одинаковых расстояниях от центра ствола изолированных до поверхности контакта (4-5 мм) стальных измерительных электродов диаметром 5 мм. Электроды соединялись с мультиметром посредством гибкого провода. Методика измерений базируется на явлении поляризации вещества древесины под действием температурных градиентов [17-19]. Этот метод в принципе отличается описанного в работе [20].

#### Результаты и обсуждение

Черными маркерами на рисунке 1 показаны результаты наблюдения динамики разности потенциалов  $U$ , нормированной на максимальное значение за время наблюдения  $U_{\max}$ . Из рисунка видно качественное повторение картины в течение трех дней наблюдения [23], что косвенно свидетельствует о корреляции исследуемых зависимостей с процессом формирования устойчивого состояния древесного растения. При увеличении температуры в течение часа на 18 % разность потенциалов плавно увеличивалась в течение 6-7 часов на 40-50%, а затем оставалась неизменной до конца времени наблюдения.

Известно, что древесина является пористой структурой. Моделирование механизмов формирования устойчивой разности потенциалов будем осуществлять в рамках классической физики. В основу концепции моделирования положим обоснованное предположение, что в древесных порах в течение времени наблюдения протекают токи ионов солей, вызванные неоднородностью распределения их количества вдоль ствола ( $dN$ ) вследствие процессов жизнедеятельности дерева и влияния факторов окружающей среды (например, изменения температуры). На основе закона Фика для плотности потока ионов солей в порах древесины  $j$  можно записать соотношение:

$$j dt = D dN / \sigma \Delta x, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – суммарная площадь пор,  $\Delta x$  – расстояние между электродами,  $D$  – коэффициент диффузии в биокompозите. С другой стороны, плотность потока определяется концентрацией и тепловой скоростью ионов  $V_T$ , величина которой изменяется при флуктуации температуры окружающей среды как

$$j = n V_T, \quad (2)$$

где  $n = N / \sigma \Delta x$  – концентрация ионов. Соотношение (1) после небольших математических преобразований с учетом (2) преобразуется в

$$\frac{dN}{N} = \eta dt, \quad (3)$$

где параметр  $\eta = V_T / D$  характеризует отношение влияний на процесс перераспределения ионов солей внутри ствола температурных градиентов и диффузии. Поскольку неизбежность формирования

динамического равновесия потоков внутри ствола физически обоснована ограниченностью количества ионов, то логично предположить, что величина параметра  $\eta$  будет уменьшаться с ростом числа ионов  $N$ , участвующих в сформированном потоке. В линейном приближении  $\eta$  можно представить в виде:

$$\eta = \eta_0 - \kappa N, \quad (4)$$

где  $\kappa$  – параметр определяемый стабилизирующими динамическое равновесие потоками внутри ствола.

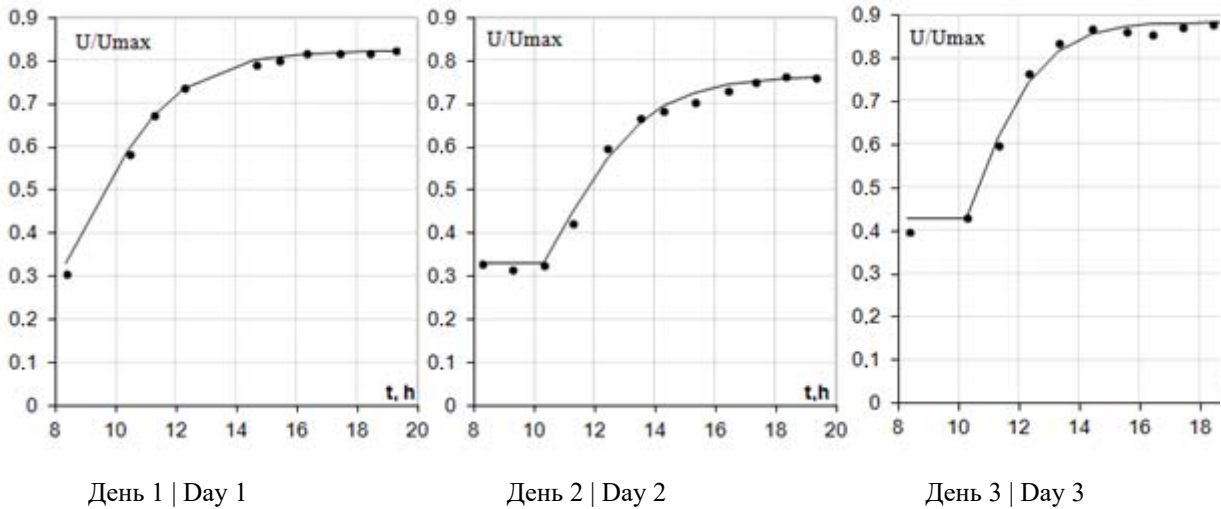


Рисунок 1. Динамика формирования вдоль ствола березы устойчивой разности потенциалов при изменении температуры окружающей среды в течение трех дней наблюдения.

Figure 1. Dynamics of the formation of a stable potential difference along a birch trunk with a change in ambient temperature during three days of observation.

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Соотношение (3) с учетом (4) является дифференциальным уравнением первого порядка, которое можно решить аналитически с начальным условием  $N = N_0$  при  $t = 0$ :

$$N = \frac{N_0 e^{\eta_0 t}}{1 + \chi(e^{\eta_0 t} - 1)}, \quad (5)$$

где введено обозначение  $\chi = \kappa N_0 / \eta_0$ .

В рамках общего физического подхода в предлагаемых условиях с большой вероятностью можно полагать равенство отношений

$$\frac{N}{N_{\max}} = \frac{n}{n_{\max}} = \frac{U}{U_{\max}}. \quad (6)$$

Из (6) с учетом (5) получаем соотношение

$$\frac{U}{U_{\max}} = \frac{U_0 e^{\eta_0 t} / U_{\max}}{1 + \chi(e^{\eta_0 t} - 1)}, \quad (7)$$

которое можно использовать для определения параметров  $U_0$ ,  $\kappa$  и  $\eta_0$ , применяя метод пошаговой

интерпретации результатов моделирования и данных, полученных при натурных измерениях.

Вычислительный эксперимент проводился с помощью разработанной программы [21], в которой модельная величина рассчитывалась по базовому соотношению (7), а оптимальность выбора параметров контролировалась с помощью критерия эффективности Нэша-Сатклиффа (ME) [22]. Критерий определялся по результатам экспериментальных и вычислительных экспериментов как

$$ME = 1 - \frac{\sum (U(t)_n^{emp} - U(t)_n)^2}{\sum (U(t)_n^{emp} - U(t)_{mean})^2}, \quad (8)$$

где  $U(t)_n^{emp}$  – данные измерений разности потенциалов в стволе березы;  $U(t)_n$  – полученные в компьютерном эксперименте результаты;  $U(t)_{mean}$  – среднее арифметическое значение  $U(t)_n^{emp}$ . Иден-

тификация параметров осуществлялась при максимальной величине критерия  $ME$ .

Результаты вычислительного эксперимента показаны в табл. 1. В последнем столбце таблицы для сравнения приведено среднее относительное отклонение результатов вычислительного экспери-

мента от данных мониторинга. Близость критерия  $ME$  к единице дает достаточную долю уверенности в том, что соотношение (7) можно использовать для моделирования динамики разности потенциалов, возникающей вдоль ствола дерева под влиянием изменения температуры окружающей среды.

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента

Table 1

Results of the computational experiment

	$\eta_0$	$\kappa$	$\eta_0/\kappa$	$U_0$	$ME$	$\varepsilon, \%$
день 1   day 1	0.65	0.79	0.823	0.33	0.997	0.07
день 2   day 2	0.65	0.851	0.764	0.33	0.993	1.66
день 3   day 3	0.84	0.95	0.884	0.43	0.991	1.73

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Моделирование позволяет прогнозировать разность потенциалов в любой момент времени (см. сплошные линии на рис. 1) и наблюдать за изменением процесса перераспределения ионов солей в порах древесины ствола с помощью электроизмерительных приборов. Анализ параметров показывает, что величина отношения  $\eta_0/\kappa$  определяется устойчивой величиной разности потенциалов (см. рис. 1). Следовательно, динамическое равновесие потоков перераспределения зарядов определяется параметрами стимулирующих и стабилизирующих процессов внутри ствола. Таким образом, предложенный подход, включающий грамотное сочетание результатов мониторинга разности потенциалов и вычислительного эксперимента, позволит сформировать обширную базу для параметров процессов формирования устойчивого динамического равновесия потоков ионов солей в порах ствола в зависимости от особенностей произрастания, суточных и сезонных изменений температуры окружающей среды и состава почвы.

Результаты исследования показывают обоснованность применения цифрового устройства, макет которого представлен в работе [23], для автоматического измерения через определенные промежутки времени разности потенциалов в стволах деревьев и накопления данных на цифровом носителе. Цифровой датчик был создан на базе автономного двухканального регистратора ECLERK-USB-2mV-G [26], который позволяет через равные

заданные временные интервалы автоматически измерять и архивировать значения напряжения в диапазоне до 50 мВ. Макет прибора удобно крепится к стволу дерева на соединительных проводах. Для расширения диапазона измерений разности потенциалов от 1 мВ до 1 В было разработано специальное согласующее устройство [26].

#### Заключение

Результаты проведенного исследования показывают, что предложенный подход к расчету параметров процессов формирования вдоль ствола дерева устойчивой разности потенциалов дает возможность сформировать базу данных для моделирования динамики процессов перераспределения ионов солей в порах. Очень важно, что накопление данных позволит не только внедрить цифровые технологии в мониторинг процессов формирования динамического равновесия потоков в древесине стволов, но также выработать базовую концепцию воздействия изменений температуры окружающей среды на состояние деревьев. Предложенная модель сочетает методы вычислительного эксперимента и данных мониторинга, полученных с контролируемой точностью. Возможность исследований влияния различных факторов окружающей среды на состояния деревьев позволит расширить спектр инструментов для формирования систем прогнозирования вероятности возникновения и развития катастрофических ситуаций в лесных экосистемах.

### Список литературы

1. Mahalingam, S. Wireless Sensor Based Forest Fire Early Detection with Online Remote Monitoring / S. Mahalingam, M. S. Deep, K. S. Krishna // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. – 2021. – Vol. 10, Iss. 5. – pp. 143–145. – DOI: <https://doi.org/10.35940/ijeat.E2670.0610521>.
2. Мониторинг гидротермического режима почвогрунтов с помощью инструмента Smat-Meter для измерения профилей влажности и температуры почвы / А. В. Базаров, С. А. Кураков, А. С. Базарова, Ю. Б. Башкуев // *Метеорология и гидрология*. – 2023. – № 3. – С. 129–131. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=54018972>.
3. Applications of low-cost environmental monitoring systems for fine-scale abiotic measurements in forest ecology / J. B. Cannon, L. T. Warren, G. C. Ohlson, J. K. Hiers, M. Shrestha, C. Mitra, E. M. Hill, S. J. Bradfield, T. W. Ocheltree // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2022. – Vol. 321. – Art. No. 108973. – <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108973>.
4. Le, T. S. Application of Remote Sensing in Detecting and Monitoring Water Stress in Forests / T. S. Le, R. Harper, B. Dell // *Remote Sensing*. – 2023. – Vol. 15, Iss. 13. – Art. No. 3360. – <https://doi.org/10.3390/rs15133360>.
5. A Review on Early Forest Fire Detection Systems Using Optical Remote Sensing / P. Barmpoutis, P. Papaioannou, K. Dimitropoulos, N. Grammalidis // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, Iss. 22. – Art. No. 6442. – <https://doi.org/10.3390/s20226442>.
6. Комплексная оценка состояния лесных генетических резерватов Свердловской области с помощью методов дистанционного и наземного обследования / С. А. Шавнин, В. А. Лебедев, В. А. Галако, В. Э. Власенко // *Лесной журнал*. – 2017. – № 1. – С. 104–118. – doi: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.1.104>. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=28140796>.
7. Determining fuel moisture thresholds to assess wildfire hazard: A contribution to an operational early warning system / J. P. Argañaraz, M. A. Landi, C. M. Scavuzzo, L. M. Bellis // *PLoS One*. – 2018. – Vol. 13, Iss. 10. – Art. No. 0204889. – doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204889>.
8. On the measurement of microclimate / I. M. D. Maclean, J. P. Duffy, S. Haesen, S. Govaert, P. De Frenne, T. Vanneste, J. Lenoir, J. J. Lembrechts, M. W. Rhodes, K. Van Meerbeek // *Methods in Ecology and Evolution* / – 2021. – Vol. 12, Iss. 8. – pp. 1397–1410. – <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13627>.
9. Rieder, J. S. Monitoring spatiotemporal soil moisture variability in the unsaturated zone of a mixed forest using electrical resistivity tomography / J. S. Rieder, C. Kneisel // *Vadose Zone Journal*. – 2023. – Vol. 22, Iss. 3. – Art. No. 20251. – doi: <https://doi.org/10.1002/vzj2.20251>.
10. Electrical resistivity tomography: patterns in *Betula pendula*, *Fagus sylvatica*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris* / A. Bär, M. Hamacher, A. Ganthaler, A. Losso, S. Mayr // *Tree Physiology*. – 2019. – Vol. 39, Iss. 7. – pp. 1262–1271. – doi: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpz052>.
11. Noninvasive Analysis of Tree Stems by Electrical Resistivity Tomography: Unraveling the Effects of Temperature, Water Status, and Electrode Installation / A. Ganthaler, J. Sailer, A. Bär, A. Losso, S. Mayr // *Frontiers in Plant Science*. – 2019. – Vol. 10. – Art. No. 1455. – doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01455>.
12. A Review on Applications of Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography Over the Last 30 Years : Perspectives for Mining Waste Monitoring / A. Dimech, L. Zh. Cheng, M. Chouteau, J. Chambers, S. Uhlemann, P. Wilkinson, Ph. Meldrum, B. Mary, G. Fabien-Ouellet, A. Isabelle // *Surveys in Geophysics*. – 2022. – Vol. 43. – pp. 1699–1759. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09731-2>.
13. Noninvasive Analysis of Tree Stems by Electrical Resistivity Tomography: Unraveling the Effects of Temperature, Water Status, and Electrode Installation / A. Ganthaler, J. Sailer, A. Bär, A. Losso, S. Mayr // *Frontiers in Plant Science*. – 2019. – Vol. 10. – Art. No. 01455. – DOI <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01455>.
14. İçel, B. Kızılcım (*Pinus brutia* Ten.) popülasyonlarında odun yoğunluğu ve radyal büyüme performansının Shigometer ile belirlenebilme imkanının araştırılması / B. İçel // *Türkiye Ormancılık Dergisi*. – 2017. – Vol. 18, Iss. 3. – pp. 241–246. – DOI: <https://doi.org/10.18182/tjf.359640>.

15. Erazo-Mesa, E. Advances in Hass avocado irrigation scheduling under digital agriculture approach / E. Erazo-Mesa, A. Echeverri-Sánchez, J. G. Ramírez-Gil // *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. – 2022. – Vol. 16, No. 1. – Art. No. 13456. – <https://doi.org/10.17584/rcch.2022v16i1.13456>.

16. Electrical response of plants to environmental stimuli: A short review and perspectives for meteorological applications / M. V. Randriamandimboisa, N. A. M. N. Razafindralambo, D. Fakra, D. L. Ravoajanahary, J. C. Gatina, N. Jaffrezic-Renault // *Sensors International*. – 2020. – Vol. 1. – Art. No. 100053. – <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2020.100053>.

17. Матвеев, Н. Н. Поляризационные явления в кристаллизующихся полимерах и биокмпозиционных материалах в неоднородном температурном поле : монография / Н. Н. Матвеев, Н. С. Камалова, Н. Ю. Евсикова; Воронеж. гос. лесотехн. ун-т им. Г.Ф. Морозова. – Воронеж, 2022. – 311 с. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=48270456>.

18. The possible mechanism for the water transport in the tree trunks in early spring / N. N. Matveev, A. A. Rychkov, N. S. Kamalova, N. Yu. Evsikova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – Art. No. 012047. – doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012047>.

19. The mechanism of the appearance of a potential difference in the natural high-molecular heterostructures by natural temperature changes / N. N. Matveev, N. S. Kamalova, N. Yu. Evsikova, Yu. A. Litvinova, L. A. Litvinova // *Ferroelectrics*. – 2018. – Vol. 536, Iss. 1. – pp. 187-193. – doi: <https://doi.org/10.1080/00150193.2018.1497413>.

20. Биоэлектрохимические системы на основе электроактивности растений и микроорганизмов в корнеобитаемой среде (обзор) / Т. Э. Кулешова, А. С. Галушко, Г. Г. Панова, Е. Н. Волкова, W. Apollon, Ch. Shuang, S. Sevda // *Сельскохозяйственная биология*. – 2022. – Том 57, № 3. – С. 425-440. – doi: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.3.425rus>. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=49168079>.

21. Камалова, Н. С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019665896. Расчетный комплекс по моделированию отклика древесины стволов древесных растений на перепад температуры окружающей среды : № 2019664997 : заявл. 22.11.2019 : опубл. 02.12.2019 / Н. С. Камалова, В. И. Лисицын, Н. Ю. Евсикова; правообладатель: Воронежский гос. лесотехн. ун-т им. Г. Ф. Морозова. – 2019. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=41532595>.

22. Лисицын, В. И. Моделирование динамики хода роста древостоев на основе термодинамического подхода / В. И. Лисицын, М. В. Драпалюк, Н. Н. Матвеев // *Известия вузов. Лесной журнал*. – 2022. – № 3. – С. 213–225. – <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-213-225>. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=48614799>.

23. Kamalova, N. S. Justification of the device operation principle for measuring the potential difference in tree trunks / N. S. Kamalova, N. Yu. Evsikova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing Ltd, 2020. – Vol. 595, Iss. 1. – Art. No. 012018. – doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012018>.

### References

1. Mahalingam S., Deep M. S., Krishna K. S. (2021) Wireless Sensor Based Forest Fire Early Detection with Online Remote Monitoring. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, Vol. 10, Iss. 5, pp. 143–145. DOI:10.35940/ijeat.E2670.0610521.

2. Bazarov A. V., Kurakov S. A., Bazarova A. S., Bashkuev Yu. B. (2023) A Tool for Monitoring Soil Hydrothermal Regimes. *Meteorologiya i Gidrologiya*, No. 3, pp. 129-131. (in Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=54018972>.

3. Cannon J. B., Warren L. T., Ohlson G. C., Hiers J. K., Shrestha M., Mitra C., Hill E. M., Bradfield S. J., Ocheltree T. W. (2022) Applications of low-cost environmental monitoring systems for fine-scale abiotic measurements in forest ecology. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 321, Art. No. 108973. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108973>.



4. Le T. S., Harper R., Dell B. (2023) Application of Remote Sensing in Detecting and Monitoring Water Stress in Forests. *Remote Sensing*, Vol. 15, Iss. 13, Art. No. 3360. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15133360>.
5. Barmoutis P., Papaioannou P., Dimitropoulos K., Grammalidis N. (2020) A Review on Early Forest Fire Detection Systems Using Optical Remote Sensing. *Sensors*, Vol. 20, Iss. 22, Art. No. 6442. <https://doi.org/10.3390/s20226442>.
6. Shavnin S. A., Lebedev V. A., Galako V. A., Vlasenko V. E. (2017) Integrated assessment of forest genetic reserves of the Sverdlovsk region by the methods of remote and ground survey. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], No. 1, pp. 104-118. (in Russian). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.104. <https://elibrary.ru/item.asp?id=28140796>.
7. Argañaraz J. P., Landi M. A., Scavuzzo C. M., Bellis L. M. (2018) Determining fuel moisture thresholds to assess wildfire hazard: A contribution to an operational early warning system. *PLoS One*, Vol. 13, Iss. 10, Art. No. 0204889. DOI: 10.1371/journal.pone.0204889.
8. Maclean I. M. D., Duffy J. P., Haesen S., Govaert S., De Frenne P., Vanneste T., Lenoir J., Lembrechts J. J., Rhodes M. W., Van Meerbeek K. (2021) On the measurement of microclimate. *Methods in Ecology and Evolution*, Vol. 12, Iss. 8, pp. 1397-1410. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13627>.
9. Rieder J. S., Kneisel C. (2023) Monitoring spatiotemporal soil moisture variability in the unsaturated zone of a mixed forest using electrical resistivity tomography. *Vadose Zone Journal*, Vol. 22, Iss. 3, Art. No. 20251. DOI: 10.1002/vzj2.20251.
10. Wang H., Guan H., Guyot A., Simmons C. T., Lockington D. A. (2016) Quantifying sapwood width for three Australian native species using electrical resistivity tomography. *Ecohydrology*, Vol. 9, Iss. 1, pp. 83-92. DOI: <https://doi.org/10.1002/eco.1612>.
11. Ganthaler A., Sailer J., Bär A., Losso A., Mayr S. (2019) Noninvasive Analysis of Tree Stems by Electrical Resistivity Tomography: Unraveling the Effects of Temperature, Water Status, and Electrode Installation. *Frontiers in Plant Science*, Vol. 10, Art. No. 1455. DOI: 10.3389/fpls.2019.01455.
12. Dimech A., Cheng L. Zh., Chouteau M., Chambers J., Uhlemann S., Wilkinson P., Meldrum Ph., Mary B., Fabien-Ouellet G., Isabelle A. (2022) A Review on Applications of Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography Over the Last 30 Years : Perspectives for Mining Waste Monitoring. *Surveys in Geophysics*, Vol. 43, pp. 1699–1759. DOI: 10.1007/s10712-022-09731-2.
13. Ganthaler A., Sailer J., Bär A., Losso A., Mayr S. (2019) Noninvasive Analysis of Tree Stems by Electrical Resistivity Tomography: Unraveling the Effects of Temperature, Water Status, and Electrode Installation. *Frontiers in Plant Science*, Vol. 10, Art. No. 01455. DOI <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01455>.
14. Icel B. (2017) Investigating the possibility of using Shigometer for determining wood density and radial growth performance among Turkish red pine (*Pinus brutia* Ten.) populations. *Turkish Journal of Forestry*, Vol. 18, Iss. 3, pp. 241-246. DOI: 10.18182/tjf.359640.
15. Erazo-Mesa E., Echeverri-Sánchez A., Ramírez-Gil J. G. (2022) Advances in Hass avocado irrigation scheduling under digital agriculture approach. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, Vol. 16, No. 1, Art. No. 13456. <https://doi.org/10.17584/rcch.2022v16i1.13456>.
16. Randriamandimisoa M. V., Razafindralambo N. A. M. N., Fakra D., Ravoajanahary D. L., Gatina J. C., Jaffrezic-Renault N. (2020) Electrical response of plants to environmental stimuli: A short review and perspectives for meteorological applications. *Sensors International*, Vol. 1, Art. No. 100053. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2020.100053>.
17. Matveev N. N., Kamalova N. S., Evsikova N. Yu. (2022) Polarization phenomena in crystallizing polymers and biocomposite materials in a non-uniform temperature field : monograph. Voronezh: Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 311 p. (in Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=48270456>.
18. Matveev N. N., Rychkov A. A., Kamalova N. S., Evsikova N. Yu. (2019) The possible mechanism for the water transport in the tree trunks in early spring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 226, Art. No. 012047. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012047.

19. Matveev N. N., Kamalova N. S., Evsikova N. Yu., Litvinova Yu. A., Litvinova L. A. (2018) The mechanism of the appearance of a potential difference in the natural high-molecular heterostructures by natural temperature changes. *Ferroelectrics*, Vol. 536, Iss. 1, pp. 187-193. DOI: 10.1080/00150193.2018.1497413.

20. Kuleshova T. E., Galushko A. S., Panova G. G., Volkova E. N., Apollon W., Shuang Ch., Sevda S. (2022) Bioelectrochemical systems based on the electroactivity of plants and microorganisms in the root-inhabited environment (review). *Sel'skohozyajstvennaya biologiya* [Agricultural biology], Vol. 57, No. 3, pp. 425-440. (in Russian). doi: 10.15389/agrobiol.2022.3.425rus. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49168079>.

21. Kamalova N. S., Lisitsyn V. I., Evsikova N. Y. (2019) Certificate of Registration of Computer Program No. 2019665896. Computational complex for modeling the responsibility of temperature transfer of environmental temperature: No. 2019664997 : dec. 11/22/2019 : publ. 02.12.2019 / N. S. Kamalova, V. I. Lisitsyn, N. Y. Evsikova; copyright holder: Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. 2019. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41532595>.

22. Lisitsyn V. I., Drapalyuk M. V., Matveev N. N. (2022) Modeling the Forest Stand Growth Dynamics Based on the Thermodynamic Approach. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], No. 3, pp. 213–225. (in Russian). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-213-225>. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48614799>.

23. Kamalova N. S., Evsikova N. Yu. (2020) Justification of the device operation principle for measuring the potential difference in tree trunks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing Ltd, 2020. Vol. 595, Iss. 1, *Art. No.* 012018. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012018.

### Сведения об авторах

*Матвеев Николай Николаевич* – доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, <https://orcid.org/0000-0001-9195-9580>, e-mail: [nmtv@vglta.vrn.ru](mailto:nmtv@vglta.vrn.ru)

*Камалова Нина Сергеевна* – кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, <https://orcid.org/0000-0001-8293-8593>, e-mail: [rcamel@yandex.ru](mailto:rcamel@yandex.ru)

✉ *Лисицын Виктор Иванович* – кандидат физ.-мат. наук, профессор кафедры общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>, e-mail: [viktor-lisicyun@yandex.ru](mailto:viktor-lisicyun@yandex.ru)

*Евсикова Наталья Юрьевна* – кандидат ф.-м. наук, зав. кафедрой общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, <https://orcid.org/0000-0001-5288-0140>, e-mail: [evsikovany\\_phlt@vglta.vrn.ru](mailto:evsikovany_phlt@vglta.vrn.ru)

*Хоай Тхыонг Нгуен* – кандидат ф.-м. наук, преподаватель, научный сотрудник электротехнического факультета, Промышленный университет Хошимина, Нгуен Ван Бао 12, г. Хошимин, Вьетнам, 700000, <https://orcid.org/0000-0003-1290-5221>, e-mail: [nguyenthuongfee@iuh.edu.vn](mailto:nguyenthuongfee@iuh.edu.vn)

### Information about the authors

*Matveev Ninkolay Nikolaevich* – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of General and Applied Physics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0001-9195-9580>, e-mail: [nmtv@vglta.vrn.ru](mailto:nmtv@vglta.vrn.ru)

*Kamalova Nina Sergeevna* – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, of the Department of General and Applied Physics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0001-8293-8593>, e-mail: [rcamel@yandex.ru](mailto:rcamel@yandex.ru)

✉ *Lisitsyn Victor Ivanovich* – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, of the Department of General and Applied Physics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva St., Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>, e-mail: [viktor-lisicyn@yandex.ru](mailto:viktor-lisicyn@yandex.ru)

*Evsikova Natalia Yurievna* – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of General and Applied Physics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0001-5288-0140>, e-mail: [evsikovany\\_phlt@vgtu.ru](mailto:evsikovany_phlt@vgtu.ru)

*Hoai Thuong Nguyen* – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Lecturer, Researcher at the Faculty of Electrical Engineering Technology, Industrial University of Ho Chi Minh City, Nguyen Van Bao 12, Ho Chi Minh City, Vietnam, 700000, <https://orcid.org/0000-0003-1290-5221>, e-mail: [nguyenthuongfee@iuh.edu.vn](mailto:nguyenthuongfee@iuh.edu.vn)

✉ – *Для контактов/Corresponding author*