

Научная статья
УДК 630.52:587/588

ЭЛЕКТРОННОЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО СОКОДВИЖЕНИЯ В ДЕРЕВЕ НА ОСНОВЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Анастасия Сергеевна Хлебникова¹, Сергей Петрович Санников²

^{1, 2} Уральский государственный лесотехнический университет,

Екатеринбург, Россия

¹ lorial2016@yandex.ru

² sannikovsp@m.usfeu.ru

Аннотация. В статье представлен анализ современных методов измерения сокодвижения в древесных растениях. Рассмотрены основные принципы и подходы к измерению ксилемного потока. Предложена концепция электронного измерительного устройства, построенного на методе распространения электромагнитных волн по направлению ксилемного потока. Данные методы и устройства позволяют обеспечить мониторинг состояния лесных экосистем и древостоев.

Ключевые слова: дерево, сокодвижение, мониторинг, измерение, проблемы

Для цитирования: Хлебникова А. С., Санников С. П. Электронное измерительное устройство сокодвижения в дереве на основе скорости распространения электромагнитной волны // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России = Scientific creativity of youth to the forest complex of Russia : материалы XXII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции студентов и аспирантов. Екатеринбург : УГЛТУ, 2026. С. 712–716.

Original article

AN ELECTRONIC MEASURING DEVICE FOR SAP FLOW IN A TREE BASED ON ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION VELOCITY

Anastasia S. Khlebnikova¹, Sergey P. Sannikov²

^{1, 2} Ural State Forest Engineering University, Ekaterinburg, Russia

¹ lorial2016@yandex.ru

² sannikovsp@m.usfeu.ru

Abstract. The article presents an analysis of modern methods for measuring sap flow in woody plants. The basic principles and approaches to measuring

xylem flow are considered. The concept of an electronic measuring device based on the method of propagation of electromagnetic waves in the direction of the xylem flow is proposed. These methods and devices make it possible to monitor the state of forest ecosystems and forest stands.

Keywords: tree, sap flow, monitoring, measurement, problems

For citation: Khlebnikova A. S., Sannikov S. P. (2026) E`lektronnoe Izmeritel`noe ustroystvo sokodvizheniya v dereve na osnove skorosti rasprostraneniya e`lektromagnitnoj volny` [An electronic measuring device for sap flow in a tree based on electromagnetic waves propagation velocity]. Nauchnoe tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii [Scientific creativity of youth to the forest complex of Russia] : materials of the XXII All-Russian (national) Scientific and Technical Conference of undergraduate and postgraduate students. Ekaterinburg : USFEU, 2026. P. 712–716. (In Russ).

Сокодвижение в дереве – это перемещение воды и растворенных в ней питательных веществ от корней к кроне (восходящий ток) и из листьев к корням (нисходящий ток). Является важным процессом обмена веществ, формирования новых клеток древесины и пр. Восходящие потоки идут по тканям древесины (ксилеме) ствола и ветвей, а нисходящие потоки – по тканям коры (флоэме). По клеткам ксилемы в древесине вода с минеральными солями поднимается вверх, через ветви к листьям, где происходит ее испарение через устьица. Органические вещества, вырабатываемые в ходе фотосинтеза, образуют поток углеводов, которые перемещаются вниз по стволу дерева, как показано на рис. 1.

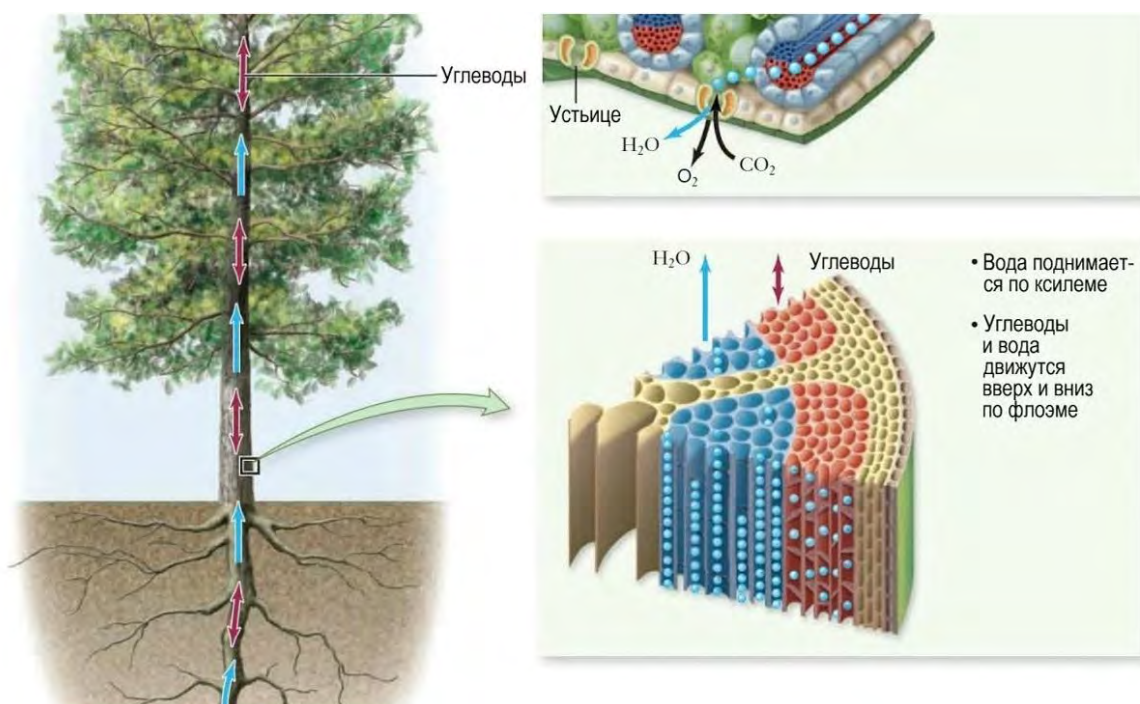


Рис. 1. Схема сокодвижения в дереве

Механизм сокодвижения сложен и до конца не изучен. В учебниках описаны некоторые предположения ученых как это происходит. Поднять влагу на 25...30 м из почвы через корни до листьев, хвои кроны с физической точки зрения не просто, но природа это умеет делать. Специалистам лесного хозяйства необходимы приборы, измеряющие сокодвижение в стволе дерева, сучьях и в другой растительности для мониторинга состояния последних.

Для решения этой проблемы посвящена данная работа, в которой сделан анализ существующих методов и способов построения (разработки) измерительных устройств, что является *целью* статьи.

На основании сформулированной цели по разработке концепции электронного измерительного устройства сокодвижения в дереве поставлены следующие *задачи*:

- 1) сделать анализ существующих методов и средств измерения сокодвижения в растительности;
- 2) разработать структурную схему.

Анализ существующих методов и средств измерения сокодвижения

Аналитический обзор опубликованных материалов показал, что для сокодирования воды в растительности в лабораторных условиях используют различного типа установки по исследованию соматического давления в клетках (капиллярах) древесины, т. к. данный механизм хорошо изучен. Сложности заключаются в том, чтобы получить стенку клетки ксилемы у свежей древесины, которая получается очень малых размеров, поэтому чаще всего моделируют этот процесс или в качестве мембраны используют несколько слоев клеток на срезе древесины, а затем делают перерасчет скорости потока жидкости.

Измерение осмотического давления π основано на широко известном законе Вант-Гоффа

$$\pi = C \cdot R \cdot T,$$

где C – молярная концентрация растворенного вещества, выраженная через комбинацию основных единиц СИ, то есть в моль/м³;

R – универсальная газовая постоянная;

T – абсолютная температура.

Для измерения осмотического давления почвенного раствора в своей работе Р. И. Зайцева и А. С. Фрид использовали лабораторный криоскоп, где температуру измеряли термометром Бекмана [1].

Из формулы и предыдущей работы видно, что температура жидкости в капиллярах клеток древесины играет определенную роль, поэтому группа ученых в работе [2] рассмотрела методы и применяемые средства измерения сокодвижения по тепловым полям, которые распространяются как в направлении потока, так и против него. Основной причиной сокодвижения считается осмотическое давление (минимальное давление, которое необходимо

приложить к раствору, чтобы остановить поток молекул растворителя через полупроницаемую мембрану клетки древесины): восходящий ток происходит из-за отрицательного давления, создаваемого листьями (хвоей) во время транспирации, что приводит к натяжению непрерывного столба воды в ксилеме. Если во время перемещения молекул растворителя через полупроницаемую мембрану изменить температурный фон, то физическое состояние молекул изменится на некоторую величину. Величина изменения будет пропорциональна изменению количества теплоты извне. На этом построены все методы, рассмотренные в работе [2], с той разницей, что в одном случае измеряется время переноса количества тепла, в другом – потеря количество теплоты, в третьем – ширина теплового поля. Принцип работы этих методов показан на рис. 2 [3].

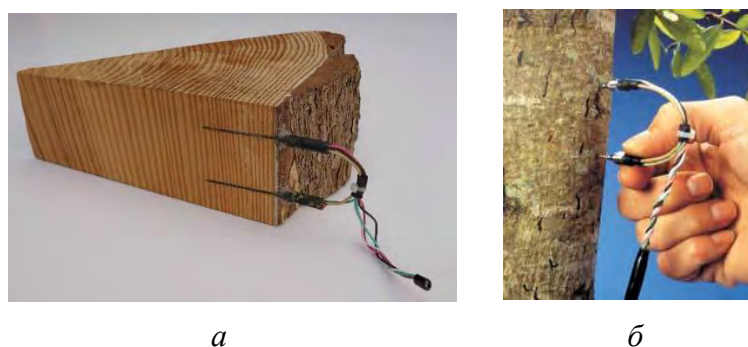


Рис. 2. Расположения датчиков на стволе дерева:
а – в разрезе; б – снаружи

Нагревательный элемент может располагаться между датчиками или внутри верхнего датчика, как показано на рис. 2.

Еще один способ измерения скорости потока предлагаемый, например, в работе Ритеша Кумара «Проблемы и достижения в области измерения сокдвижения в сельском хозяйстве и агролесоводстве: обзор работ с акцентом на ядерный магнитный резонанс» [3]. Принцип работы построен на том, что каждое ядро атома любого химического элемента имеет свой собственный резонанс колебаний в однородном магнитном поле. В исходном состоянии ядро занимает положение в пространстве в соответствии с направлением силовых магнитных линий, т. е. вектор намагниченности атома совпадает с этими линиями. Чтобы изменить направленность вектора намагниченности атома, его нужно «раскачать», воздействуя на него внешним импульсом магнитного или электрического поля, перпендикулярного исходному. Затем при помощи чувствительного сенсора измерить параметры и направление колебаний возбужденного атома.

Если колебания возбужденного атома находятся под действием осмотического давления и перемещаются в потоке сока древесины, то это воздействие будет препятствовать его собственным колебаниям. Измеренная величина будет пропорциональна силе воздействия на атом вещества,

в данном случае это атомы молекулы воды, будет пропорциональна скорости сокодвижения. Для изготовления измерителя сокодвижения потребуется сильное магнитное поле по диаметру ствола дерева.

Концепция электронного измерительного устройства

Сделанный выше анализ показал, что самым чувствительным может оказаться измеритель с ядерно-магнитным резонансом. Измеритель, изготовленный на использовании тепловых полей, работает, он инерционен в сравнении с предыдущим и требует индивидуальной настройки для каждого дерева, т. к. плотность, а также теплопроводность древесины различается друг от друга. Измерители сокодвижения, построенные на осмосе, мало изучены, и практических материалов нами не найдено, хотя лабораторные модели измерителей сокодвижения есть и результаты подтверждаются.

Нами предлагается новый принцип измерения сокодвижения с применением электромагнитной энергии высокой частоты в диапазоне от 300 МГц до 300 ГГц и выше. Длина волны в пределах 1 мм потребует меньшей мощности и времени на нагрев атомов воды и на раскачку их в электрическом поле. Внешний вид измерительного датчика представлен на рис. 3. Чувствительным элементом являются индуктивные катушки, расположенные внутри полый иглы.

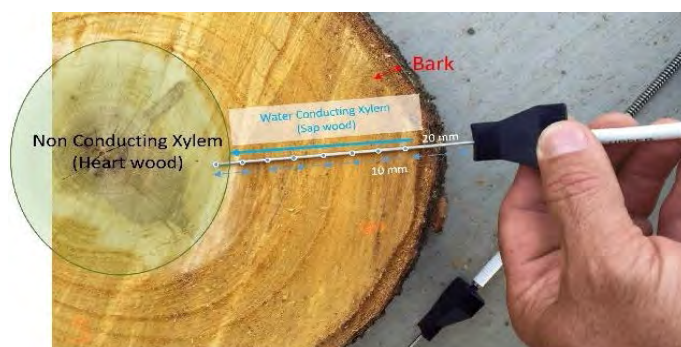


Рис. 3. Структурная схема датчика измерения влажности воздуха в лесу

Заключение

Представленная разработка выполнена на основе результатов, полученных при анализе методов измерения сокодвижения.

Список источников

1. Зайцева Р. И., Фрид А. С. Измерение осмотического давления почвенного раствора криоскопическим методом и его метрологическая характеристика // Почвы и окружающая среда. 2018. Т. 1, № 3. С. 180–186.
2. Methods to Estimate Sap Flow / E. Fernández, Ja. Čermák, Ye. Cohen [et al.] // ISHS Working Group on Sap Flow. 2017. P. 1–9.
3. Challenges and advances in measuring sap flow in agriculture and agroforestry: A review with focus on nuclear magnetic resonance / R. Kumar, M. Hosseinzadehtaher, N. Hein [et al.] // Frontiers in Plant Science. 2022. P. 1–16.