

04;12

Газоразрядная зондовая микроскопия водопроводящих каналов в древесине

© В.И. Иванов-Омский, Е.И. Иванова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Лесотехническая академия, Санкт-Петербург
E-mail: ivanov.ivom@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 2 декабря 2012 г.

Излагаются результаты применения метода газоразрядной визуализации каналов водного транспорта в образцах древесины (трахеид). Продемонстрированы на примерах образцов березы и осины особенности метода как разновидности зондовой микроскопии и его дополнительные возможности по сравнению с оптической микроскопией. Делается вывод о его пригодности в качестве дополнительной диагностики структур растительной и животной тканей.

Признаком живого организма растительного или животного происхождения служит, как известно, функционирование процессов обмена. В случае древесины наряду с газовым обменом, несомненно, важную роль играет водный обмен, в смысле взаимодействия растительной ткани дерева с водой и содержащимися в ней минеральными и органическими компонентами. В реализации этого взаимодействия важную роль играет система древесных водопроводящих каналов (трахеид), диагностике состояния которых может быть полезен метод газоразрядной визуализации ГРВ [1]. Действительно, при инициировании газового разряда в полостях неоднородного диэлектрика [2,3] возникает светящийся газоразрядный зонд, указывающий на области повышенной электрической проводимости, как на место, в непосредственной близости которого локализируют газоразрядные токи. Газоразрядная зондовая микроскопия (ГРЗМ) получила свое развитие для целей детектирования проводящих включений в диэлектрических материалах в работах [2] и [3], в которых были развиты основные идеи метода. Более обширная информация доступна в монографии [4]. Мы здесь лишь кратко отметим основные особенности метода, при этом имея в виду, что носителем интересующей нас информации является свечение газового разряда в коронной стадии, локализованного в области неоднородности электри-

ческого поля. Вариант применения такой методики для локализации областей повышенной влажности в древесине описан в работе [5]. Недостатком этой методики с контактной записью изображения на фотобумагу явилось небольшое разрешение и отсутствие возможности оперативной обработки результатов эксперимента. Ниже будет описана методика, в которой фотобумага заменена системой с регистрацией изображения с более высоким разрешением. С этой целью локализация газового разряда осуществлялась цифровой фотокамерой с последующей компьютерной обработкой результатов. В данном эксперименте локализация светового пятна от газового разряда указывает на местоположение в древесине каналов, заполненных водой и древесными соками (трахеид). Это оказывается возможным потому, что основные компоненты древесины — целлюлоза, лигнин и прочие — являются плохо проводящими материалами по сравнению с водой, тем более обогащенной минеральными веществами, как это имеет место в древесном соке. Заполненная соками трахея образует как бы систему проводящих каналов, замыкающих цепь газового разряда, который локализуется на выходе этой трахеиды в разрядный промежуток. Этот сценарий схематически изображен на рис. 1. Можно, в известном смысле, сказать, что заполненная древесным соком трахеида действует по принципу громоотвода, локализуя газовый разряд в воздушном промежутке между прозрачным электродом и ее выходом на поверхности образца, или в непосредственной близости от нее. Поэтому картина распределения каналов свечения разряда отражает картину распределения сокопроводящих каналов по сечению древесного среза. Имеет место, таким образом, реализация своеобразной разновидности зондовой микроскопии растительной ткани, где в роли зонда выступает газовый разряд. В целом эта техника способна дать картину распределения трахеид по поверхности и, следовательно, указать на наиболее пропитанные влагой участки древесного среза, а относительная яркость свечения плазменного зонда и размер светящегося пятна могут позволить придать этим наблюдениям количественный характер. Заметим, что в случае животной ткани роль трахеид могли бы сыграть капилляры кровеносной или лимфатической систем.

На рис. 1 представлена схема реализации ГРЗМ в нашем случае. Образец древесины 1 с трахеидами 4 располагается на подкладочном металлическом электроде 3, тщательно отполированном. Качество полировки подкладочного электрода гарантирует от появления ложных изображений каналов свечения разрядов, не связанных со структурой

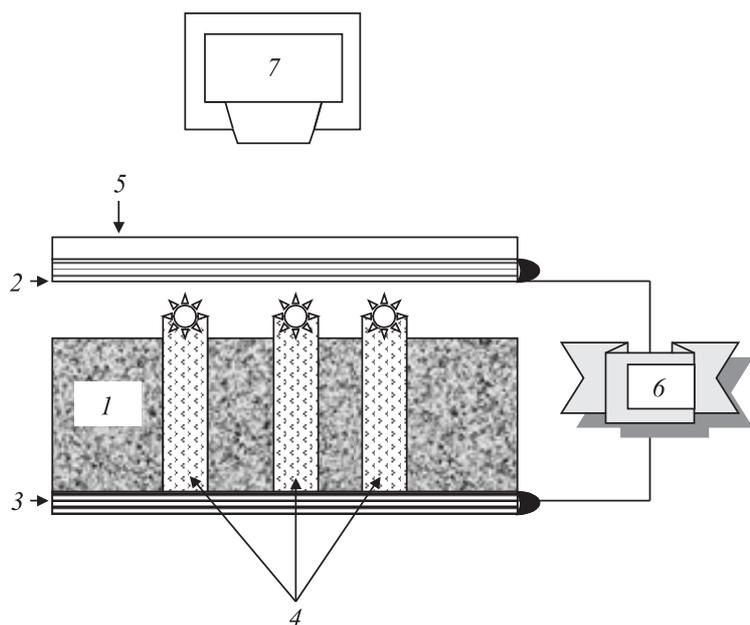


Рис. 1. Схема эксперимента.

образца, и определяет пространственное разрешение картинки. Образец накрывается стеклянной пластиной 5 с нанесенным на нее слоем SnO_2 2, выступающим в роли прозрачного электрода. Самостоятельный коронный разряд поджигается в воздушном промежутке между выходом трахеиды на поверхность и прозрачным электродом 2. Регулируя зазор между электродами, напряжение и частоту прикладываемого с помощью генератора электрического поля 6, можно добиться наилучшего качества изображения поджигаемого разряда с требуемой глубины образца. Запись изображения с помощью цифровой камеры 7 транслируется в компьютер, где может быть обработана с помощью, например, программы Photoshop, как это делается в данной работе. Толщина воздушного промежутка в минимуме составляла 0.1–0.15 mm, что на половину порядка превышало высоту шероховатостей на поверхности образца. Потенциал зажигания на частоте 6–12 KHz был порядка 1000 V, а напряжение горения не превышало 30% потенциала

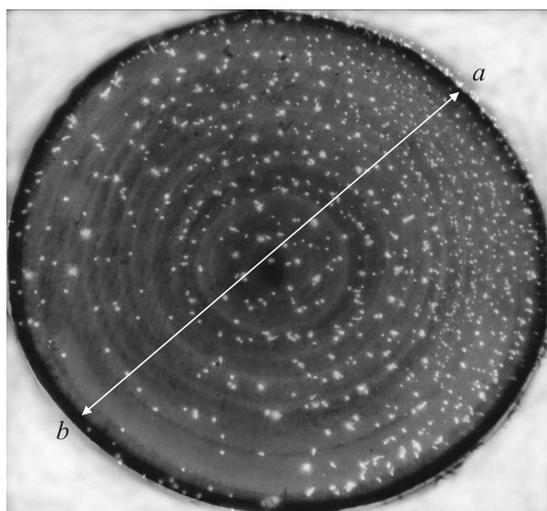


Рис. 2. Фото образца березы в электрическом поле, инициирующем газовый разряд. Отмечен диаметр, вдоль которого измерялась плотность трахеид на рис. 3.

зажигания. В качестве объектов исследования были выбраны береза бородавчатая (*Betula pendula* Roth) и осина (*Populus tremula* L.). Подбирались некрупные деревья с толщиной на высоте 1.3 м около 5 см, из которых изготавливались поперечные спилы толщиной 4–5 мм. Деревья срубались в начале весны 2008 г. Спилы сразу фотографировались в различных режимах как в отраженном свете, так и в электрическом поле.

На рис. 2 представлена картина свечения газового разряда на срезе березы (*Betula pendula* Roth), совмещенная с его фотографическим изображением в отраженном свете, на котором просматриваются следы годовых колец. Бросается в глаза неоднородное распределение трахеид по поверхности среза и диаметрам. Встречаются крупные трахеиды диаметром $\approx 200 \mu\text{m}$ в областях с низкой их плотностью и мелкие с наименьшим диаметром $\approx 20\text{--}25 \mu\text{m}$ в областях их высокой плотности. Размер последних практически совпадает с типичным размером клеток древесины. В целом же размеры светящихся пятен непрерывно распределены в указанных выше пределах, а что касается распределения

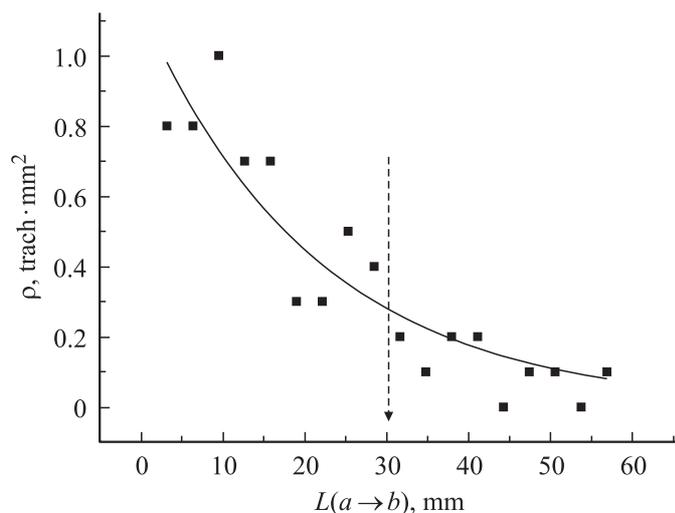


Рис. 3. Изменение плотности трахеид вдоль диаметра ab на рис. 2. Пунктирной стрелкой указана середина среза.

трахеид по площади среза, то крупные трахеиды концентрируются в основном в центральной части среза. Не наблюдается простой корреляции между слоями годовых колец и расположением трахеид. На рис. 3 представлено распределение плотности трахеид вдоль отмеченного на рис. 2 диаметра (60 mm). Довольно равномерно распределены трахеиды по периметру среза, что отражает хорошо известный факт расположения основных каналов, по которым происходит движение соков в дереве. Однако обращает на себя внимание асимметрия в расположении трахеид в толще ствола, относительно его центра. Эта асимметрия, впрочем, легко наблюдается и непосредственно на фотографии рис. 2. Плотность ρ (число трахеид/ mm^2) экспоненциально спадает вдоль отмеченного на рис. 2 диаметра по закону, который может быть аппроксимирован соотношением

$$\rho = 1.1 \exp \frac{L}{21}, \quad (1)$$

где L (mm) — расстояние от края среза. Такое распределение трахеид свидетельствует о том, что трахеиды в процессе их формирования,

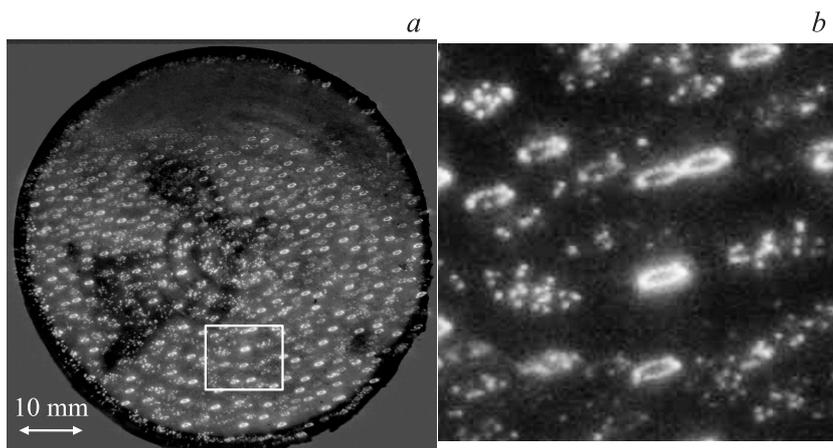


Рис. 4. Свечение газового разряда на выходах трахеид в образце осины: *a* — общий вид; *b* — увеличенный фрагмент в прямоугольнике общего вида.

скорее всего, подвергались внешним деформационным усилиям. Можно предположить, что кривая на рис. 3 описывает потенциальный профиль этих усилий. Картина распределения трахеид в различных породах деревьев позволяет выявить закономерности в формировании ансамблей трахеид в процессе роста дерева. В изображенном на рис. 2 срезе березы в среднем только каждый второй квадратный миллиметр сечения ствола содержит трахеиду, как следует из данных, приведенных на рис. 3.

Любопытная самоорганизация трахеид наблюдалась нами в случае осины (*Populus tremula*), результаты ГРЗМ которого представлены на рис. 4, *a, b*. Как можно видеть на рис. 4, *a*, имеет место коагуляция одиночных трахеид в ансамбли. Часть ансамблей имеет в плоскости сечения эллиптическую форму. При более детальном рассмотрении можно видеть (рис. 4, *b*), что эллипсы действительно построены из одиночных трахеид, причем размеры всех одиночных трахеид в первом приближении одинаковы, совпадая по размерам с клетками древесины, независимо от того, принимает ансамбль форму эллипса или нет. Главные оси всех эллипсоидов параллельны друг другу, что позволяет думать о том, что трахеиды, образующие ансамбли на этом участке ствола, не параллельны его оси. И можно полагать, что эллипсоиды

оказываются проекциями окружностей, которые отражают реальную форму ансамблей трахеид.

Целью данного сообщения было изучить возможности ГРВ и в частности ГРЗМ как инструментов диагностики путей, по которым осуществляет водный обмен растительных организмов с окружающим миром. Полученные нами предварительные результаты показывают, что эти методы способны существенным образом дополнить традиционные методы исследования древесины. Представляется, что дальнейшее развитие предложенных методов ГРЗМ имеет возможность обогатить экологический и биологический инструментарию современного естествознания.

Авторы благодарны Л.Л. Леонтьеву за предоставление образцов и С.М. Герасюте за поддержку работы.

Список литературы

- [1] Герасюта С.М., Иванова Е.И., Леонтьев Л.Л. // Известия СПбГЛТА. 2009. В. 196. С. 203–209.
- [2] Галактионов Б.В., Иванова Е.И. и др. // Дефектоскопия. 1987. № 8. С. 86.
- [3] Galaktionov B.V., Ivanova E.I., Syrnikov Yu.P. // Phys. Metallogr. 1998. V. 85 (4). P. 443.
- [4] Бойченко А.П., Шустов М.А. Основы газоразрядной фотографии. Томск, 2004.
- [5] Fromm J., Suhlfleisch M., Schumacher P. // Holz als Roh and Werkstoff. 1998. V. 56. P. 437.