

УДК 550.837.2:621.396.6

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОРАДАРНОЙ ТОМОГРАФИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ СТВОЛОВ ДЕРЕВЬЕВ

© 2020 г. Е. Б. Терентьева^{а, *}, М. С. Судакова^{а, b}, А. Ю. Калашников^{с, **}

^аГеологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^бИнститут криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, ул. Малыгина, 86, Тюмень, 625000 Россия

^сНациональный исследовательский Московский Государственный Строительный Университет,
Ярославское шоссе, д. 26, Москва, 129337 Россия

*E-mail: genia_teren@mail.ru

**E-mail: x_kalash@mail.ru

Поступила в редакцию 24.10.2017 г.

После доработки 21.05.2019 г.

Принята к публикации 10.12.2019 г.

Метод лучевой томографии, часто применяемый к неживым объектам, впервые использован в качестве инструмента исследования внутреннего строения ствола живого дерева. Полевой эксперимент проведен в разные сезоны – в январе и мае 2016 г. В эксперименте использовался двухканальный георадар “Zond 12e” (“RadarSystems”, Латвия) с двумя экранированными антеннами с центральными частотами в воздухе 2 ГГц. Георадарная томография использована для определения распределения диэлектрической проницаемости в стволе, которая напрямую связана с влажностью древесины. Различные части ствола (кора, ядро, заболонь), а также здоровые и пораженные участки различаются по влажности, поэтому метод георадарной томографии позволяет увидеть как строение ствола, так и наличие дефектов. Проведенные наблюдения показали, что значения диэлектрической проницаемости электромагнитных волн внутри ствола соответствуют значениям, характерным для стволов живых деревьев. Различные части ствола (ядро, заболонь, кора) отличаются по диэлектрической проницаемости, дефектов внутреннего строения не обнаружено. Заметны сезонные вариации электрофизических свойств: в январе 2016 г. среднее значение диэлектрической проницаемости составило 14, в мае 2016 г. – 25, т.е. почти на 80% выше. Повышение диэлектрической проницаемости связано с увеличением влажности внутри ствола, которое коррелирует с сезонными колебаниями температуры и влажности воздуха. Ввиду отсутствия механического воздействия на объект исследования и высокой разрешающей способности георадарная томография имеет преимущество по сравнению с другими методами изучения состояния деревьев, такими как микробурение или акустическая томография.

Ключевые слова: георадиолокация, неразрушающий контроль, томография, электромагнитная волна, мониторинг влажности, дуб черешчатый, обследование стволов.

DOI: 10.31857/S0024114820020096

Оценка состояния деревьев все чаще используется в связи с необходимостью сохранения и поддержания исторических парковых ансамблей, заповедных территорий и в целях безопасности городской среды. Воздействие негативных факторов может приводить к изменению физических характеристик древесины, а в тяжелых случаях – к потере дерева. В последние годы помимо визуального осмотра деревьев, который и не выявляет внутренних повреждений, широко применяются инструментальные, в том числе деструктивные для объекта исследований методы, с использованием шупа и пенетрометра, резистографа (измеряющего момент сопротивления сверлению, разделяющего древесину на твердую,

рыхлую или пустоты) (Johnstone et al., 2010), а также методы электротомографии и акустические методы, включающие в себя ультразвуковую и акустическую томографию (Sambuelli et al., 2003; Rabe et al., 2004; Göcke et al., 2007; Leong et al., 2012).

Остановимся подробнее на способах оценки состояния деревьев. Визуальная оценка включает в себя как сам осмотр в поисках видимых внутренних дефектов, так и инструментальные измерения дефектов и оценку прочности древесины (Mattheck, Breloer, 1994; Hayes, 2001; Luley, 2005). Инструментальная оценка включает в себя как прямые и косвенные методы исследования.

Одним из прямых методов является измерение глубины внедрения в древесину стержня с кони-

ческим наконечником при одинаковом контрольном усилии на него, причем по значению глубины погружения стержня судят о свойствах древесины (Леонов, 1984).

Резистограф — это прибор для засверливания очень тонким сверлом — буром. Момент сопротивления сверлению считывается устройством и преобразуется в резистограмму, которая свидетельствует о плотности древесины (Rinn et al., 1996).

Метод электротомографии дает изображение распределения удельного сопротивления в разрезе живого дерева. Вариация значений удельного сопротивления может свидетельствовать о процессах гниения или о различии свойств разных участков древесины внутри живого дерева (Shortle, 1982). Основной проблемой данного метода является низкая проводимость древесной коры, и, как следствие, некорректное измерение напряжения.

Импульсная акустическая томография — еще один метод, с помощью которого можно получать изображение внутренней структуры дерева путем регистрации скорости распространения звуковой волны. В работе (Gilbert, Smiley, 2004) приводятся возможности метода акустической томографии применительно к задачам численной оценки объемов гниения в стволах живых деревьев. При его использовании на точность результата оказывает влияние контакт датчиков с корой и затухание сигнала, в некоторых случаях необходимо внедрение датчиков под кору.

Несмотря на информативность данных методов диагностики древесины, у них имеются и весомые недостатки, препятствующие широкому их использованию: они основаны на сверлении, связаны с нарушением целостности ствола дерева, что может повлечь за собой его гибель, поскольку в образующееся отверстие могут проникнуть споры грибов (Wessolly, 1995). Электротомография сопровождается внедрением электродов в дерево на глубину порядка 3 или 4 см, а резистограф требует сверления и проникает на глубину до 150 мм. Даже такой малоинвазивный метод, как акустическая томография, несет в себе некоторые риски, поскольку в процессе работы в кору дерева забиваются гвозди для установки датчиков. Кроме этого, пустота для акустических волн является низкоскоростной аномалией, поэтому плотность лучей в ней будет низкая, что ведет к некорректному определению скорости, а, значит, к ошибкам в ее идентификации и точности определения границ аномального участка. При изучении значительных по диаметру объектов, а также уникальных экземпляров, требующих шадающего подхода, применение упомянутых методов невозможно, поскольку в процессе измерений нарушается внешняя оболочка дерева, что может отрицательно сказаться на его жизнеспособности. При

этом сами измерения обладают низкой разрешающей способностью.

Метод георадиолокации уже завоевал свое прочное место в решении множества инженерных задач, таких как поиски подземных шахт, трубопроводов, кабелей (Daniels, 2004; Youn, 2004; Ground ..., 2009; Sato, 2012). Георадиолокация, в том числе томографическая методика успешно применялась для поиска пустот в строительных конструкциях (Судакова и др., 2017а и б). Между тем, сфера применения метода георадиолокации неуклонно расширяется, и среди задач, решаемых с его помощью, появились задачи обнаружения и 3D-картирования корней деревьев, оценка их биомассы (Hruska et al., 1999; Butnor et al., 2001, 2006; Hagrey, 2007; Bassuk et al., 2011; Shiping et al., 2014), оценка повреждений фундаментов различных строений, вызываемых корнями деревьев (Satriani et al., 2010) и т.д. Вопрос применения георадара в целях обнаружения ядровой гнили в стволах деревьев рассматривается в работах (Nicolotti et al., 2003; Lorenzo et al., 2010; Leong et al., 2012). G. Nicolotti с соавт. (2003) отмечают сложности при использовании георадара в режиме совмещенного источника и приемника — плохой контакт антенн с корой, сложности интерпретации данных, а также затухание сигнала ввиду использования высоких частот (1000 МГц). Метод томографического обращения георадарных данных ранее применялся лишь для определения расположения корневой системы (Hagrey, 2007).

Методика георадарных наблюдений подразумевает регистрацию высокочастотного электромагнитного сигнала, распространяющегося в стволе и несущего информацию о распределении диэлектрической проницаемости в нем. В данной работе рассмотрено использование метода георадарной томографии, ранее не применяемого к подобным объектам исследований. При его использовании времена вступления прямой волны пересчитываются в специальной программе в скорости, а затем — значения диэлектрической проницаемости. Результат георадиолокационной томографии — числовой: значения диэлектрической проницаемости внутри исследуемой среды. То есть в такой модификации нет необходимости в “расшифровке” георадарных записей, характерной для традиционной георадиолокации.

Были выполнены измерения на стволе живого дерева (дуб черешчатый) в разные сезоны — зимой (в январе) и весной (в мае). Результатом использования является высокоразрешенное распределение скоростей электромагнитных волн и диэлектрической проницаемости внутри ствола. На основе этих значений можно определить распределение влажности внутри ствола живого дерева, а используемый нами подход полностью исключает негативное механическое воздействие.

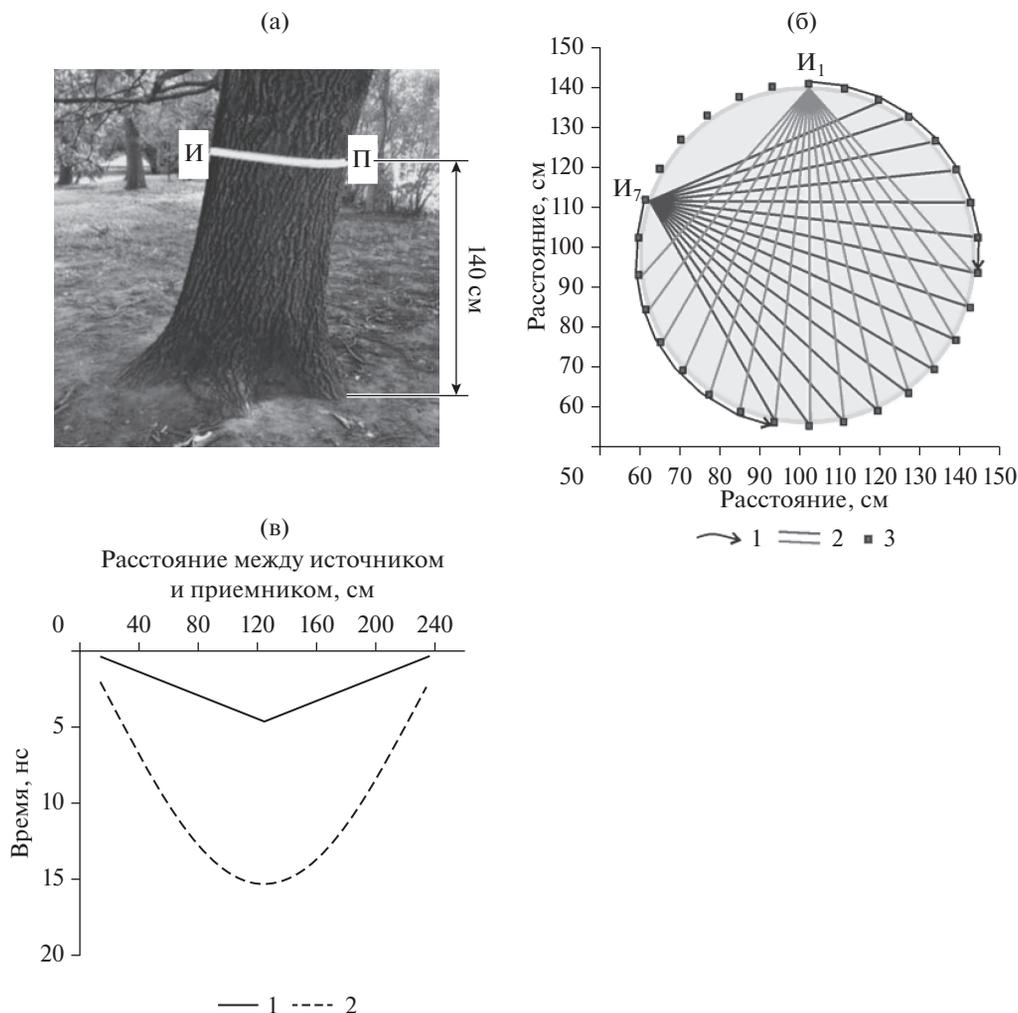


Рис. 1. Фото объекта исследования (дуба черешчатого) (а). Белой линией на стволе показана плоскость исследования. Положение источника и приемника показано схематично белыми прямоугольниками. Схема ствола и расположения источников и приемников на плоскости исследования (б). I_1 и I_7 – положение источников 1 и 7. Лучи приходящих в приемники волн: 1 – лучи “воздушной” волны, 2 – лучи прямой волны (волны, проходящей сквозь ствол дерева). Источник и приемник (3) – находятся на поверхности ствола. Результат решения прямой задачи (в): годографы волн 1 – “воздушная” волна, 2 – прямая волна, проходящая через ствол дерева.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

В качестве объекта исследования выбран дуб черешчатый, окружность ствола которого на высоте груди (порядка 140 см) составляет около 290 см (рис. 1а). Данное дерево входит в садовый комплекс при Главном здании МГУ имени М.В. Ломоносова на Ленинских Горах, который был заложен в 1950 г. Таким образом, на момент эксперимента дубу было 66 лет. При визуальном осмотре дерево выглядит абсолютно здоровым, без следов болезней или деятельности вредителей, пустоты отсутствуют. Для определения влияния сезонных изменений на распределение диэлектрической проницаемости (влажности) внутри ствола эксперименты проводились 29 января и 3 мая 2016 г.

Теория метода георадиолокационной томографии

Георадиолокация – косвенный метод исследования, использующий сверхвысокочастотные электромагнитные волны (25 МГц–5 ГГц), возбуждаемые импульсным способом. Измеряемой величиной является время прихода электромагнитной волны, которое может быть пересчитано в скорость распространения волны в исследуемой среде v . Скорость распространения волны связана с диэлектрической проницаемостью среды ϵ соотношением:

$$\epsilon = \frac{c^2}{v^2}, \quad (1)$$

где c – скорость электромагнитной волны в вакууме (воздухе).

Различия в диэлектрической проницаемости воздуха, воды и твердой части (табл. 1) обеспечивают успешность применения метода георадиолокации в природных и искусственных средах, поскольку делает возможным их разделение на качественном уровне или пересчет электромагнитных характеристик в механические: состав, пористость, влажность и др.

Лабораторные измерения электрофизических свойств древесины на разных частотах (например, (Torgovnikov, 1993; Кочеткова и др., 2013)) показали, что вода — основной компонент, определяющий значения электрофизических свойств дерева, в том числе диэлектрической проницаемости (табл. 1). В пределах микроволновых частот наблюдается рост диэлектрических свойства с ростом содержания влаги для разных пород деревьев (Sahin, Ay, 2004). При этом наблюдается анизотропия в измеренных значениях: так, диэлектрическая проницаемость ϵ_{\perp} , измеренная при направлении вектора напряженности электрического поля E вдоль волокон, почти в 2 раза превышает диэлектрическую проницаемость ϵ_{\parallel} , измеренную при направлении напряженности поперек в случае живого дерева и до 30% — в случае высушенной древесины (Torgovnikov, 1993). Распределение значений диэлектрической проницаемости (скорости распространения электромагнитных волн) внутри ствола как вдоль, так и поперек волокон напрямую свидетельствует о распределении влажности.

Лучевая георадарная томография является аналогом метода сейсмической томографии применительно к полю электромагнитных волн. Подробно этот метод описывается в работах (Яновская, Порохова, 2004; Nolet, 2008; и др.). В настоящее время для изучения трехмерных скоростных неоднородностей наибольшее распространение получили методы лучевой томографии.

При томографических измерениях источник и приемник находятся на некотором известном расстоянии друг от друга, в большинстве случаев на разных сторонах исследуемого объекта (рис. 1а). После излучения сигнала источником он распространяется через исследуемый объект со скоростью V и через определенное время t регистрируется приемником. Зарегистрированная запись (георадарная трасса) представляет собой значение напряжения на приемнике в зависимости от времени. Таким образом, трасса содержит вышедший из источника и прошедший через среду сигнал (“прямая волна”), зарегистрированный приемником во время t . Один из подходов к томографической инверсии — лучевая томография — состоит в том, чтобы, зная измеренное время прихода прямой волны t рассчитать из него скорость V между источником и приемником (в исследуемой среде), считая, что сигнал (волна) рас-

Таблица 1. Диэлектрическая проницаемость некоторых природных веществ на частоте около 1000 МГц при комнатной температуре (по данным (Владов, Сулакова, 2017; Ground ..., 2009; Torgovnikov, 1993; и др.))

Вещество	Диэлектрическая проницаемость, ϵ
Воздух	1
Вода пресная	81
Лед пресный	3
Древесина мягких пород	45–65, 35–55
живое дерево*	
твердых пород	35–55, 15–30
живое дерево*	
высушенная*	2–3, 1.5–2

*Приведены два значения — вдоль и поперек древесных волокон.

пространяется вдоль луча по законам геометрической оптики.

Следуя теории геометрической оптики, каждому принятому сигналу соответствует пройденный по лучу путь l , который является кривой, описывающей траекторию движения сигнала между источником и приемником. Время прохождения сигнала связано со скоростью и лучом следующим соотношением:

$$t = \int \frac{dl}{V(l)}. \quad (2)$$

Во время исследования процесс записи сигналов повторяется для разных положений источника и приемника и расстояний между ними, для того, чтобы в результате получить множество лучей, пересекающих всю область интереса. После завершения съемки времени прихода прямой волны снимаются с каждой трассы, и эти значения используются для обратного томографического обращения.

Для n трасс в результате получается вектор-столбец значений времени t размером $(n \times 1)$. Цель томографического обращения — получить распределение скоростей V в исследуемом объекте по известному столбцу t . Чтобы выполнить вычисления, вся область интереса разбивается на $(n \times m)$ элементарных ячеек, скорость в каждой из которых считается постоянной и не известна. Такое разбиение предполагает, что и лучи тоже разбиты на сегменты, один сегмент луча соответствует одной элементарной ячейке, все сегменты — прямолинейные отрезки. Длина одного сегмента равна пути, который проходит сигнал в соответствующей ячейке.

Время прихода волны, соответствующее конкретному лучу из интеграла по лучу становится суммой длин сегментов, умноженных на значение

медленностей s в ячейках (медленность – величина, обратно пропорциональная скорости $s = V^{-1}$):

$$t = \sum_{i=1}^r s_i l_i. \quad (3)$$

В итоге решение задачи лучевой томографии сводится к решению системы линейных уравнений:

$$L * s = t, \quad (4)$$

где L и S – матрицы размером $(n \times m)$. Цель томографического обращения – решить эту систему для s .

Данная задача не является линейной, так как лучи в соответствии с принципом Ферма являются функциями скорости (медленности). Принцип Ферма гласит, что путь луча между двумя точками соответствует минимальному времени пробега. Из этого, в частности, следует, что лучи “стремятся попасть” в высокоскоростные области и “оглабают” низкоскоростные. Эта нелинейность предполагает необходимость задания начальной модели и итеративность процесса решения.

Процесс решения обратной задачи лучевой томографии представляет собой многократное решение прямой задачи и состоит в подборе такой скоростной модели среды, которая удовлетворяет условию минимальной невязки между наблюдаемыми и рассчитанными временами прихода электромагнитных волн в приемную антенну. Процесс томографического обращения происходит в специальном программном обеспечении (Reflexw, Geotom CG и др.).

После получения решения в виде значения скоростей они пересчитываются в диэлектрическую проницаемость по формуле (1). Представление результата в виде распределения диэлектрической проницаемости является более наглядным, так как ее значение напрямую связано с объемной влажностью (существует несколько эмпирических и теоретических работ, в которых это описано, например (Sihvola, 2000; Huisman et al., 2003; Ground ..., 2009).

Аппаратура и методика

Для проведения томографического эксперимента необходимо использовать двухканальную (по крайней мере) аппаратуру, в которой приемные и излучающие антенны разделены между собой. Расстояние между ними в случае исследования стволов относительно небольшое – обычно не больше 1 м, и длину волны (частоту антенны) следует выбирать с точки зрения наивысшей разрешающей способности, т.е. минимально возможную. Здесь лучшим выбором будут высокочастотные антенны с частотой в воздухе 1–3 ГГц. Увеличение частоты больше 3 ГГц приведет к значительным потерям энергии на поляризацию

и частотной дисперсии диэлектрической поляризации (Torgovnikov, 1993; Ground ..., 2009; Владов, Судакова, 2017). Среда действует на сигнал как фильтр нижних частот (Калинин и др., 2003; Изюмов и др., 2008), поэтому следует ожидать снижения центральной частоты спектра сигнала внутри среды. Среди серийно выпускаемых комплектов георадаров частотами 1–3 ГГц обладают антенны типа “бабочка”, оснащенные отражающим экраном.

Для проведения нижеописанного эксперимента использовался двухканальный георадар “Zond 12e” (“RadarSystems”, Латвия) с двумя экранированными антеннами типа “бабочка” с центральными частотами в воздухе 2 ГГц. Согласно спецификации производителя, разрешение составляет 0.06–0.1 м, глубина исследования – 1.5–2 м. Излучающая и приемная антенны были ориентированы таким образом, чтобы оси диполей были параллельны друг другу и перпендикулярны направлению движения приемника. Такая ориентация была выбрана с точки зрения наибольшей площади пересечения диаграмм направленности антенн и направления энергии излучения в среду. Кроме этого, данное взаимное расположение источников и приемников обеспечивает получение радарограмм, которые мало подвержены влиянию “боковых” помех (Annap, 2001).

Точки излучения и приема должны располагаться так, чтобы область интереса пересекала максимальное число лучей. Если это возможно, измерения должны проводиться со всех сторон исследуемого объема среды, т.е. по всей окружности ствола. Расстояние между точками физических наблюдений не должно превышать размер элементарной ячейки сети, по которой будет проходить томографический расчет, и которая в конечном итоге определяет разрешение результирующего скоростного разреза. На рисунке 1б схематично изображено положение точек излучения и приема в горизонтальной плоскости исследования (показаны лучи двух волн, приходящих из источника в приемник: цифрой 1 показан луч воздушной волны, “бегущей” в воздухе вокруг ствола, цифрой 2 – лучи прямой волны, распространяющейся в дереве). В приведенном опыте пункты излучения и приема располагались по периметру ствола на высоте около 140 см, пункты излучения – по половине периметра. Интервал между пунктами излучения составил 10 см.

Эксперимент проходил следующим образом: источник прислонялся к стволу и оставался неподвижен, в то время как приемник перемещался по периметру дуба. После того, как приемник описывал полный круг в горизонтальной плоскости вокруг ствола, источник перемещался на 10 см по периметру, и операция регистрации повторялась снова. Были записаны георадарограммы (ансам-

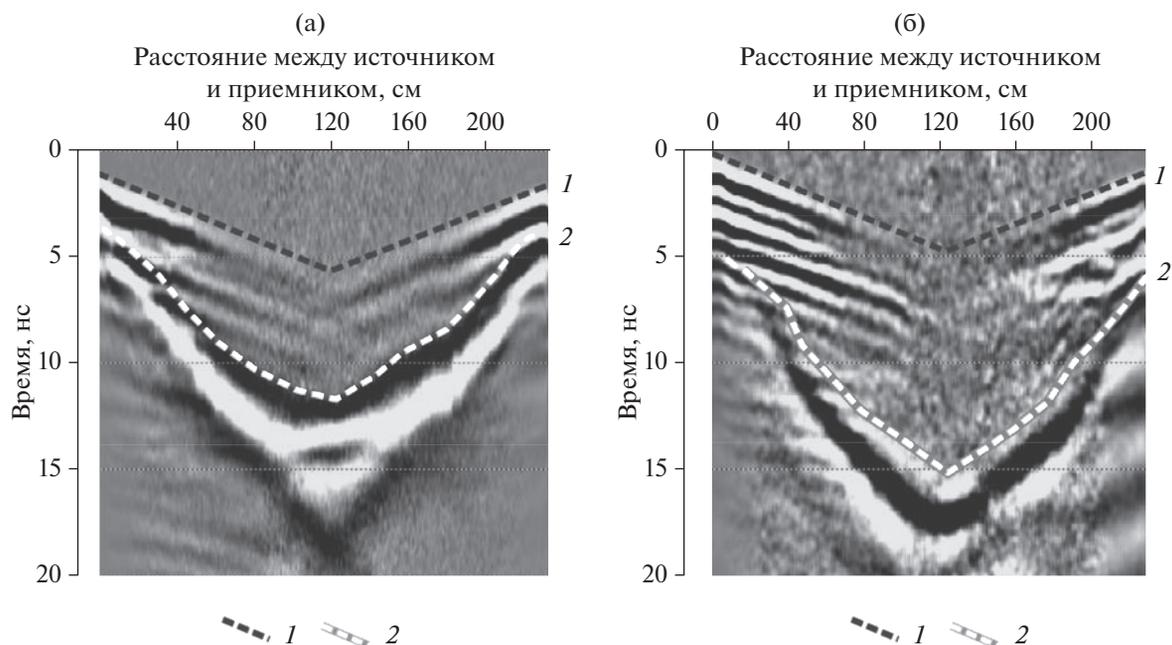


Рис. 2. Результат георадиолокационной съемки. Георадарограммы, полученные при исследовании дуба при одном и том же положении источника и перемещении приемника по периметру в январе (а), и в мае (б) 2016 г. 1 – “воздушная” волна (распространяется в воздухе); 2 – прямая волна (проходит сквозь ствол дерева).

бли трасс для разных положений приемника) для 15 разных положений источника. Особенности геометрии наблюдения объясняются принципом взаимности, благодаря чему источники могут располагаться только на половине периметра исследуемого объекта. Приемная антенна перемещалась в режиме непрерывной съемки по всему периметру ствола, что обеспечивало лучевое покрытие во всех направлениях. Привязка георадарных трасс по профилю осуществлялась с помощью рулетки и специальных “меток”, установленных через каждые 10 см.

На рис. 1в приведена схема, показывающая рассчитанные годографы волн, которые должны быть отображены на полученных георадарограммах (решение прямой задачи). Годограф – зависимость времени прихода сигнала от расстояния между источником и приемником. Источник находится в одной точке, а приемник перемещается по периметру дуба. Расчет проводился для ствола диаметром 280 см, скорости внутри дерева, составившей $6 \text{ см} \cdot \text{нс}^{-1}$ и диэлектрической проницаемости, равной 25. Лучевая томография, которая используется для восстановления скоростей внутри изучаемого объекта, основана на пикировании времени первых вступлений сигнала. В георадиолокационной томографии же первой всегда приходит волна, распространяющаяся между источником и приемником в воздухе со скоростью света (рис. 1в, 1). Информационный сигнал – прямая волна – приходит во вторых вступлениях

(рис. 1в, 2). На рис. 1в видно, что форма годографа воздушной и прямой волн отличаются друг от друга, волны разрешены во времени. Результат натурального эксперимента, соответствующего рис. 1в приведен на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Примеры полученных георадарограмм для одного и того же положения источника показаны на рис. 2а (январь 2016), 2б (май 2016). Вопрос выделения полезных волн на георадарограммах, полученных методом томографии, рассмотрен в работе (Судакова и др., 2017б). В первых вступлениях выделяется волна, распространяющаяся по воздуху между источником и приемником (1), ее скорость $30 \text{ см} \cdot \text{нс}^{-1}$. Целевые волны, распространяющиеся через ствол дерева (“прямые” волны), приходят в последующих вступлениях (2). Годографы выделенных волн показаны на рис. 2 пунктиром: волна 1 – черным пунктиром, волна 2 – белым пунктиром. Годографы полученных волн соответствуют рассчитанным и приведенным под соответствующими цифрами на рис. 1в. Время прихода прямой волны (2) в мае (рис. 2б) в среднем больше, чем в январе (рис. 2а), что говорит об уменьшении скорости, и, следовательно, увеличении влажности. Воздушная волна, как и ожидалось, не меняется со временем. Расчет проводился для ствола диаметром 280 см и скорости внутри дерева, равной $6 \text{ см} / \text{нс}$.

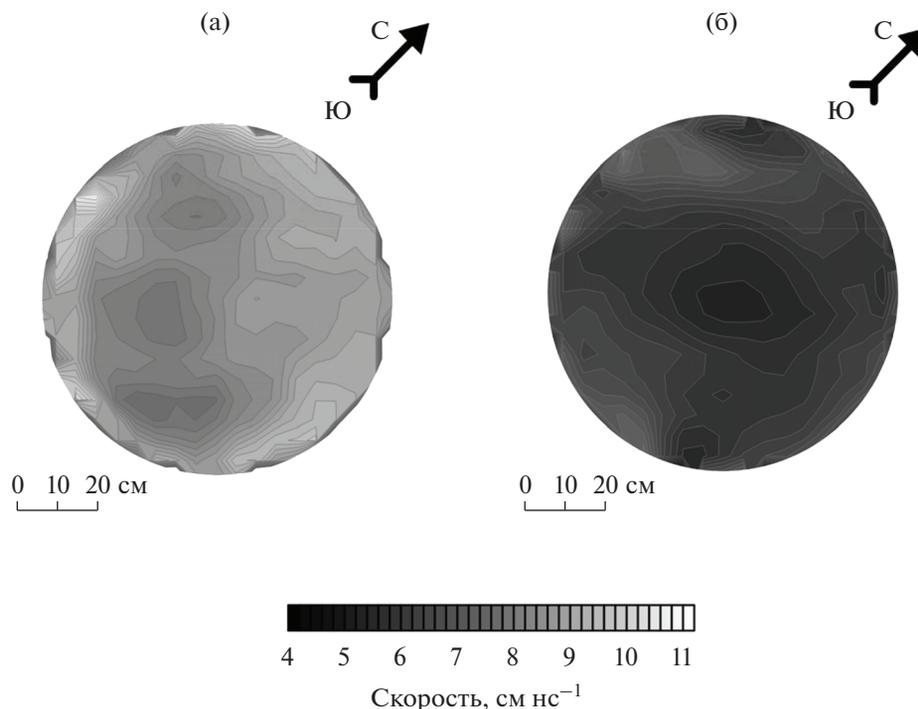


Рис. 3. Результат томографического обращения: распределение значений диэлектрической проницаемости в срезе дуба черешчатого в январе (а) и мае (б) 2016 г.

Расчет скоростей из времен вступлений прямых волн велся в программе “GeoTomCG” (GeoTom, LLC). Основные принципы и алгоритмы расчетов изложены в статье (Tweeton, 1992). Программа подразумевает расчет по регулярной сетке с использованием прямоугольных ячеек. Начальная модель задавалась с постоянной скоростью 7 см нс^{-1} . Расчет велся по сетке с квадратными ячейками со стороной 5 см . Скоростной разрез рассчитан по ~ 600 независимым лучам. Далее скорость по формуле (1) пересчитывалась в диэлектрическую проницаемость.

Результаты пересчета пропикированных времен в значения ϵ показаны на рис. 3а, 3б. Распределение значений диэлектрической проницаемости внутри ствола соответствует значениям для живой древесины (табл. 1). Согласно нашим измерениям, центральная часть ствола характеризуется более высокими значениями диэлектрической проницаемости, чем периферийная (рис. 3, в центре ствола более светлые области, чем по краям), что говорит о неравномерном распределении влажности в стволе. Области с различной диэлектрической проницаемостью соответствуют различным частям ствола: коре, ядру, заболони (Швамм, 2011). Особенно это заметно в мае, когда влаги в стволе в целом больше. Областей аномальных значений диэлектрической проницаемости ($\epsilon \geq 55$, что соответствует гнилым мок-

рым областям или $\epsilon = 1-3$, что соответствует сухой древесине или воздушным пустотам) не выявлено. Таким образом, дефекты в стволе в плоскости исследования отсутствуют.

Результаты заметно отличаются по значению диэлектрической проницаемости: в январе 2016 г. средняя ϵ составила 14, в мае 2016 г. — 25, т.е. почти на 80% выше. Повышение диэлектрической проницаемости напрямую связано с увеличением влажности внутри ствола. Согласно работе (Давыдов, 1969) влажность живых деревьев существенно варьируется как в течение суток, так и в годичном цикле. Так, максимальное количество воды в стволах деревьев содержится весной перед распусканием почек (Колесникова, 1998). В июле–августе влажность древесины снижается и к осени достигает своих минимальных значений. Осенью поступление воды продолжается до промерзания почвы, и обводненность стволов деревьев увеличивается. В течение зимы влажность древесины закономерно снижается (Израэль, 1983).

На рис. 4а, 4б приведены данные температуры и влажности воздуха за период с 06 января по 20 мая 2016 г., измеренные на метеостанции МГУ. До первого измерения наблюдался длительный период отрицательных температур, и, несмотря на высокую влажность, вся свободная вода находилась в замерзшем состоянии. До второго измерения, в конце апреля–мае, среднее значение

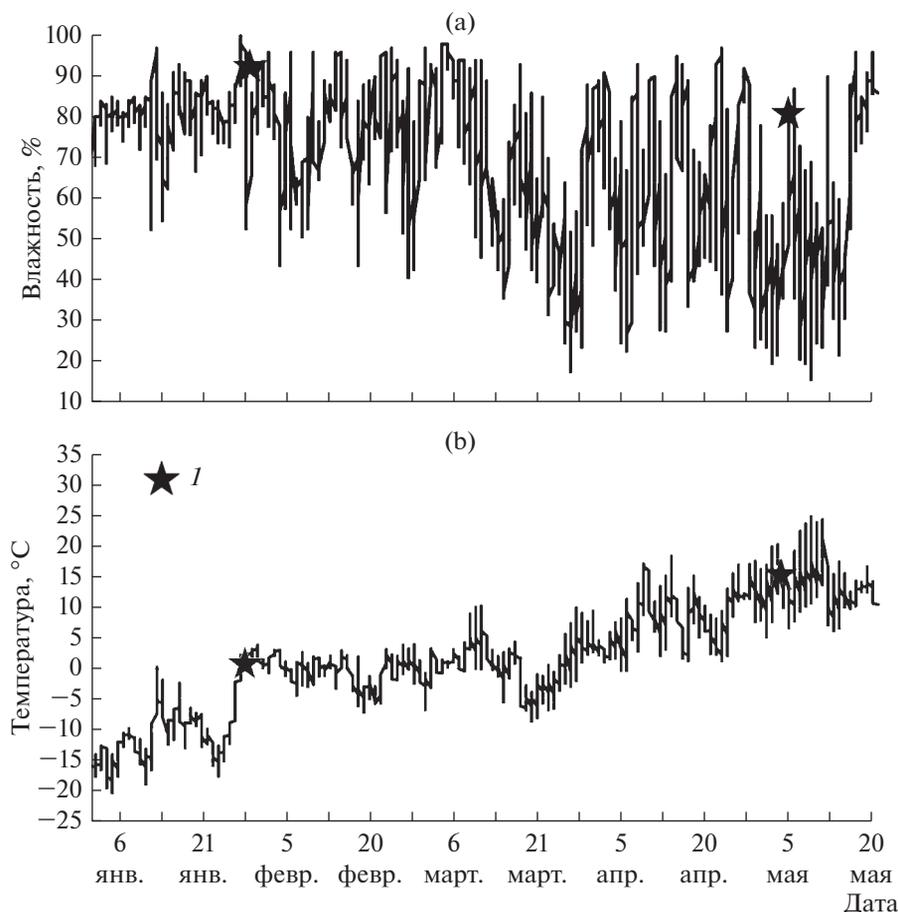


Рис. 4. Среднесуточные температура (а) и влажность (б), полученные в 2016 г. на метеостанции МГУ. 1 — даты измерений.

влажности воздуха было ниже, около 70%, однако среднесуточная температура воздуха составила порядка 10°C и не опускалась ниже нуля, что отразилось на значении содержания воды внутри ствола дуба.

Определение диэлектрической проницаемости в твердой части ствола открывает потенциальные возможности для их пересчета во влажность по имеющимся в литературе эмпирическим зависимостям (например, Jingxia et al., 2014). Среди эмпирических формул, наиболее часто используемых для определения влажности на основе диэлектрической проницаемости среды, можно назвать уравнения Топпа (Topp et al., 1980).

Изучение распределения влаги в стволе живого дерева имеет большое теоретическое и практическое значение. И это касается как неживой, так и живой древесины. Как известно, наиболее распространенная причина разрушения древесины — атака грибов и насекомых. При этом содержание влаги признано наиболее значимым условием этой атаки. Минимальная величина весовой влажности, при которой начинает действовать разру-

шающий древесину грибок, составляет 17%, тогда как оптимальная величина для развития грибкового поражения лежит в диапазоне от 30 до 70% (Mai et al., 2015). Эти значения зависят как от типов древесины, так и от типов грибка. Распределение влаги в стволе живых деревьев свидетельствует об интенсивности физиологических процессов, возмозможном наличии инфекций, последствиях нападения насекомых и т.д. Как известно, роль водобмена в частях дерева во многом определяет процессы роста, накопление биомассы и в конечном итоге саму продуктивность насаждений. Согласно работам (Лир и др., 1974; Крамер, 1983), водный режим растений связан с физиологическим состоянием, поэтому оценка жизнеспособности древесных растений может быть произведена на основе изучения водного режима. Если обратиться к промышленным задачам, то показатели влажности также крайне важны — ведь именно этот параметр влияет на режимы сушки и условия хранения пиломатериалов.

Влажность — одна из основных характеристик древесины, она представляет собой выраженное в

процентах отношение массы воды к сухой массе древесины. Абсолютной влажностью древесины называется отношение массы влаги, находящейся в данном объеме древесины, к массе абсолютно сухой древесины. Величина абсолютной влажности древесины может меняться от нуля до 250%. Влага в древесине бывает связанная и свободная: первый тип находится в стенках древесных клеток, второй тип занимает полости клеток и межклеточные пространства. Предполагается, что свободная вода содержится внутри макрокапилляров радиусом более 10^{-5} см (Chudinov, 1984).

В настоящее время имеется множество предпосылок для развития предлагаемого нами подхода ввиду особого интереса исследователей к измерениям влажности древесины в диапазоне частот георадара, а также высокой чувствительности характеристик электромагнитных волн к вариации влажности на соответствующих частотах (Mai et al., 2015; Razafindratsima et al., 2017; Sahin, Ay, 2004). При этом изученность вопроса оставляет желать лучшего: об этом свидетельствует число опубликованных работ, которые не исчерпывают данной тематики.

Заключение. Проведенные исследования показали, что метод георадарной томографии позволяет изучать структуру строения ствола с высокой разрешающей способностью (до первых сантиметров), а также получать информацию о распределении диэлектрической проницаемости внутри ствола и, соответственно, влажности.

Доступ к стволу дерева со всех сторон обеспечивает полное лучевое покрытие, позволяющее детально оценить структуру ствола в поле электромагнитных волн. Согласно нашим измерениям, центральная часть ствола характеризуется более высокими значениями диэлектрической проницаемости, чем периферийная, что говорит о неравномерном распределении влажности в нем. Области с диэлектрической проницаемостью соответствуют различным частям ствола: коре, ядру, заболони. Областей аномальных значений диэлектрической проницаемости ($\epsilon \geq 55$, что соответствует гнилым мокрым областям, или $\epsilon \div 1-3$, что соответствует сухой древесине или воздушным пустотам) не выявлено. Это говорит об отсутствии дефектов в стволе в плоскости исследования.

Мониторинговые наблюдения показали зависимость колебаний диэлектрической проницаемости (влажности) внутри ствола живого дерева от сезонных значений влажности воздуха и его температуры: в январе 2016 г. среднее значение диэлектрической проницаемости составило 14, в мае 2016 г. — 25, т.е. почти на 80% выше. Дальнейшее наблюдение должно дать больше информации о процессах, происходящих внутри дерева, и

о возможных проблемах, влияющих на жизнеспособность дерева.

При исследованиях по методу георадарной томографии на дерево не оказывается механического воздействия, а измерения проводятся *in vivo*.

Коллектив авторов благодарит кафедру метеорологии и климатологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и лично старшего преподавателя П.И. Константинова за предоставленные метеорологические данные.

Коллектив авторов благодарит рецензентов журнала “Лесоведение” за ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений. М.: Геос, 2017. 240 с.
- Давыдов А.В. Продуктивность и естественный отпад ельников // Лесн. журн. 1969. № 1. С. 20–22.
- Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды и пути их решения. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 96 с.
- Исюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С. Теория и методы георадиолокации: Учеб. пособие. М.: Горная книга, 2008. 196 с.
- Калинин А.В., Владов М.Л., Шалаева Н.В. Оценка глубинности георадиолокационных исследований на основе классической теории // Вестник МГУ. Сер. Геология. 2003. № 3. С. 44–48.
- Колесникова А.А. Закономерности изменения влажности древесины ели во времени // Деревообрабатывающая промышленность. 1998. № 4. С. 26–27.
- Кочеткова Т.Д., Суляев В.И., Волчков С.И. Диэлектрическая проницаемость хвойных пород древесины в диапазоне частот 3–12 ГГц // Вестник СибГАУ. 2013. № 5(51). С. 101–104.
- Крамер П.Д. Физиология древесных растений. Пер. с англ. М.: Лесная пром-сть, 1983. 464 с.
- Леонов Л.В. Технологические измерения и приборы в лесной и деревообрабатывающей промышленности. М.: Лесная пром-сть, 1984. С. 76–81.
- Лир Х., Польштер Г., Фидлер Г.И. Физиология древесных растений. М.: Лесная пром-сть. 1974. 423 с.
- Судакова М.С., Терентьева Е.Б., Калашников А.Ю. Поиск и определение размеров конструктивных пустот с помощью георадарной томографии на примере двух колонн // Международный журн. по расчету гражданских и строительных конструкций. 2017а. Т. 13. № 1. С. 94–109.
- Судакова М.С., Калашников А.Ю., Владов М.Л., Терентьева Е.Б., Марченко А.Л., Садуртдинов М.Р. Поиск конструктивных пустот в строительных конструкциях методом георадиолокации // Геотехника. 2017б. № 2. С. 30–37.

- Швамм Е.Е.* Дровесиноведение: Учебн. пособие. Екатеринбург: Уральский центр академического обслуживания, 2011. 193 с.
- Яновская Т.Б., Порохова Л.Н.* Обратные задачи геофизики. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского гос. университета, 2004. 216 с.
- Annan A.P.* Ground penetrating radar workshop notes. Mississauga: Sensors & Software, 2001. 192 p.
- Bassuk N., Grabosky J., Mucciardi A., Raffel G.* Ground-penetrating radar accurately locates tree roots in two soil media under pavement // *Arboriculture & Urban Forestry*. 2011. V. 37. № 4. P. 160–166.
- Butnor J.R., Doolittle J.A., Kress L., Cohen S., Johnsen K.H.* Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States // *Tree Physiology*. 2001. N 21. P. 1269–1278.
- Butnor J.R., Johnsen K.H., Wikström P., Lundmark T., Linder S.* Imaging tree roots with borehole radar // *Proceedings of the 11th International conference on ground penetrating radar*, Columbus, USA, 2006. P. 1–8.
- Chudinov B.S.* Water in the wood. Novosibirsk: Nauka, 1984. 263 p.
- Daniels D.J.* Ground penetrating radar. 2nd ed. London, UK: Institution of Engineering & Technology, 2004. 726 p.
- Gilbert E.A., Smiley E.T.* Picus sonic tomography for the quantification of decay in white oak (*Quercus alba*) and hickory (*Carya spp.*) // *J. Arboriculture*. 2004. V. 30. P. 277–280.
- Göcke L., Rust S., Weihs U., Gunther T., Rucker C.* Combining sonic and electrical impedance tomography for the non-destructive testing of trees // *Proceedings of 15th international symposium on nondestructive testing of wood*. Forest products society. 2007. Madison: P. 31–42.
- Ground penetrating radar theory and applications / Ed. H.M. Jol.* Oxford: Elsevier, 2009. 523 p.
- Hagrey S.A.* Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity. // *J. Experimental Botany*. 2007. V. 58. № 4. P. 839–854.
- Hayes E.* Evaluating Tree Defects (2 ed). Rochester: Safe-trees, 2001. 34 p.
- Hruska J., Cermák J., Sustek S.* Mapping tree root systems with ground-penetrating radar // *Tree Physiology*. 1999. V. 19. № 2. P. 125–130.
- Huisman J.A., Hubbard S.S., Redman J.D., Annan A.P.* Measuring soil water content with ground penetrating radar: a review. // *Vadose Zone J.* 2003. V. 2. № 4. P. 476–491.
- Jingxia L., Gao L., Wen J.* Research on the relationship between moisture content and the dielectric constant of the tree trunk by the radar wave // *Computer Modelling & New Technologies*. 2014. V. 18. № 11. P. 1171–1175.
- Johnstone D., Moore G., Tausz M., Nicolas M.* The measurement of wood decay in landscape trees. // *Arboriculture & Urban Forestry*. 2010. V. 36. № 3. P. 121–127.
- Leong E.-Ch., Burcham D, Yok-King F.* A purposeful classification of tree decay detection tools // *Arboricultural Journal: The International J. Urban Forestry*. 2012. V. 34. № 2. P. 91–115.
- Lorenzo H., Pérez-Gracia V., Novo A., Armesto J.* Forestry applications of ground-penetrating radar // *Forest Systems*. 2010. V. 19. № 1. P. 5–17.
- Luley C.L.* Wood decay fungi common to living urban trees in the Northeast and Central United States. Naples: Urban Forestry, 2005. 61 p.
- Maï T.C., Razandratsima S., Sbartai Z.M., Demontoux F., Bos F.* Non-destructive evaluation of moisture content of wood material at GPR frequency // *Construction & Building Materials*. 2015. V. 77. P. 213–217.
- Mattheck C.G., Breloer H.* Field guide for visual tree assessment (VTA) // *Arboricultural J.* 1994. V. 18. P. 1–23.
- Nicolotti G., Socco L.V., Martinis R., Godio A., Sambuelli L.* Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees // *J. Arboriculture*. 2003. V. 29. № 2. P. 66–78.
- Nolet G.* A breviary of seismic tomography, imaging the Interior of the Earth and Sun. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 360 p.
- Rabe C., Ferner D., Fink S., Schwarze F.* Detection of decay in trees with stress waves and interpretation of acoustic tomograms // *Arboricultural J.* 2004. V. 28. № 1–2. P. 3–19.
- Razafindratsima S., Sbartai Z.M., Demontoux F.* Permittivity measurement of wood material over a wide range of moisture content // *Wood Science & Technology*. 2017. V. 51. Is. 6. P. 1421–1431.
- Rinn F., Schweingruber F.H., Schiir E.* RESISTOGRAPH and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species // *Holzforschung*. 1996. V. 50. № 4. P. 303–311.
- Sahin H., Ay N.* Dielectric properties of hardwood species at microwave frequencies // *J. Wood Science*. 2004. V. 50. P. 375–380.
- Sambuelli L., Socco L.V., Godio A., Nicolotti G., Martinis R.* Ultrasonic, electric and radar measurements for living trees assessment // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 2003. V. 44. № 3–4. P. 253–279.
- Sato M., Yokota Y., Takahashi K., Grasmueck M.* Landmine detection by 3D GPR system // *Proceedings of SPIE*. 2012. № 8357. P. 23–27.
- Satriani A., Loperte A., Proto M., Bavusi M.* Building damage caused by tree roots: laboratory experiments of GPR and ERT surveys // *Advances in Geosciences*. 2010. V. 24. P. 133–137.
- Shiping Z., Chunlin H., Yi S., Motoyuki S.* 3D Ground penetrating radar to detect tree roots and estimate root biomass in the field // *Remote Sensing*. 2014. V. 6. № 6. P. 5754–5773.
- Shortle W.C.* Decaying Douglas-fir wood: Ionization associated with resistance to a pulsed electric current // *Wood Science*. 1982. V. 15. № 1. P. 29–32.
- Sihvola A.* Mixing rules with complex dielectric coefficients // *Subsurface Sensing Technologies & Applications*. 2000. V. 1. № 4. P. 393–415.
- Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.* Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines // *Water Resource Research*. 1980. V. 16. P. 574–582.

Torgovnikov G. Dielectric properties of wood and wood-based materials. Berlin, Heidelberg, N.Y.: Springer-Verlag, 1993. 196 p.

Tweeton D.R., Jackson M.J., Roessler K.S. BOMCRATR: A curved ray tomographic computer program for geophysical applications. Washington: U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, 1992. 39 p.

Youn H., Chen C. Neural Detection for Buried Pipes Using Fully-Polarimetric Ground Penetrating Radar System // Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar. 2004. V. 1. P. 303–306.

Wessoly L. Fracture diagnosis of trees. Part 3: Boring is no way for reliable fracture diagnosis // Stadt und Grün. 1995. № 9. P. 635–640.

Using the Ground Penetrating Radar Tomography for the Studying of Tree Trunks

E. B. Terent'eva^{1,*}, M. S. Sudakova^{1,2}, and A. Yu. Kalashnikov^{3,}**

¹*Faculty of Geology, Moscow State University, Leninskiye Gory, 1, Moscow, 119991 Russia*

²*Institute of Earth's Cryosphere, TSC, SD RAS, Malygina st., 86, Tyumen, 625000 Russia*

³*Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoye hw., 26, Moscow, 129337 Russia*

*E-mail: genia_teren@mail.ru

**E-mail: x_kalash@mail.ru

Ray tomography method, which often used for studying inanimate objects, was employed for the first time for studying a trunk of a living tree. The field experiment was carried out in two different seasons – January and May, 2016. For the experiment was used a two-channel ground penetrating radar “Zond 12e” (“RadarSystems”, Latvia) with two shielded antennae with central frequency of 2 GHz in air. Ground penetrating tomography was used for studying the distribution of dielectric permeability inside a tree trunk, which correlates directly with wood moisture content. Different parts of the a trunk (bark, core, alburnum) have different moisture content, and so do the healthy and infected areas within them, thus this method helps to examine the trunk's structure as well as the presence of any defects. The study performed has shown that values of dielectric permeability within the trunk are in line with the values typical for living trees. Different parts of the trunk (bark, core, alburnum) have different dielectric permeability values, no inner defects were found there. Seasonal variations of electric characteristics were observed: in January, 2016 mean value of dielectric permeability estimated 14, in May, 2016 – 25, i.e. by almost 80% higher. An increase in dielectric permeability is related to the increase in moisture content inside the trunk, which in turn correlates with the seasonal changes in temperature and air humidity. Due to a nondestructive nature and high resolution, the ground penetrating tomography has an advantage over the other methods of assessment of tree's condition, such as microboring or acoustic tomography.

Keywords: georadiolocation, nondestructive control, tomography, electromagnetic wave, moisture content monitoring, common oak, trunks studying.

REFERENCES

Annan A.P., *Ground penetrating radar workshop notes*, Mississauga: Sensors & Software, 2001, 192 p.

Bassuk N., Grabosky J., Mucciardi A., Raffel G., Ground-penetrating radar accurately locates tree roots in two soil media under pavement, *Arboriculture & Urban Forestry*, 2011, Vol. 37, No. 4, pp. 160–166.

Butnor J.R., Doolittle J.A., Kress L., Cohen S., Johnsen K.H., Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States, *Tree Physiology*, 2001, No. 21, pp. 1269–1278.

Butnor J.R., Johnsen K.H., Wikström P., Lundmark T., Linder S., Imaging tree roots with borehole radar, Proc. of the 11th International conference on ground penetrating radar, Columbus, USA: 2006, pp. 1–8.

Chudinov B.S., *Water in the wood*, Novosibirsk: Nauka, 1984, 263 p.

Daniels D.J., *Ground penetrating radar*, London, UK: Institution of Engineering & Technology, 2004, 726 p.

Davydov A.V., Produktivnost' i estestvennyi otpad el'nikov (Spruce forests productivity and natural falling off), *Lesn. zhurnal*, 1969, No. 1, pp. 20–22.

Gilbert E.A., Smiley E.T., Picus sonic tomography for the quantification of decay in white oak (*Quercus alba*) and hickory (*Carya* spp.), *J. Arboriculture*, 2004, Vol. 30, pp. 277–280.

Göcke L., Rust S., Weihs U., Gunther T., Rucker C., Combining sonic and electrical impedance tomography for the non-destructive testing of trees, Proc. of 15th international symposium on nondestructive testing of wood, Madison: Forest products society, 2007, pp. 31–42.

Hagrey S.A., Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity, *J. Experimental Botany*, 2007, Vol. 58, No. 4, pp. 839–854.

Hayes E., *Evaluating Tree Defects*, Rochester: Safetrees, 2001, 34 p.

Hruska J., Cermák J., Sustek S., Mapping tree root systems with ground-penetrating radar, *Tree Physiology*, 1999, Vol. 19, No. 2, pp. 125–130.

- Huisman J.A., Hubbard S.S., Redman J.D., Annan A.P., Measuring soil water content with ground penetrating radar: a review, *Vadose Zone Journal*, 2003, Vol. 2, No. 4, pp. 476–491.
- Izrael' Y.A., *Ekologiya i kontrol' sostoyaniya prirodnoi sredy i puti ikh resheniya* (Ecology and environmental conditions control: methods of solving the issues), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, 96 p.
- Izyumov S.V., Druchinin S.V., Voznesenskii A.S., *Teoriya i metody georadiolokatsii* (Georadiolocation: theory and methods), M.: Gornaya kniga, 2008, 196 p.
- Jingxia L., Gao L., Wen J., Research on the relationship between moisture content and the dielectric constant of the tree trunk by the radar wave, *Computer Modelling & New Technologies*, 2014, Vol. 18, No. 11, pp. 1171–1175.
- Johnstone D., Moore G., Tausz M., Nicolas M., The measurement of wood decay in landscape trees, *Arbiculture & Urban Forestry*, 2010, Vol. 36, No. 3, pp. 121–127.
- Jol H. M., *Ground penetrating radar theory and applications*, Oxford: Elsevier, 2009, 523 p.
- Kalinin A.V., Vladov M.L., Shalaeva N.V., Otsenka glubinnosti georadiolokatsionnykh issledovaniy na osnovе klassicheskoi teorii (Depths assessment of georadiolocation based on a classical theory), *Vestnik MGU. Ser. Geologiya*, 2003, No. 3, pp. 44–48.
- Kochetkova T.D., Suslyayev V.I., Volchkov S.I., Dielektricheskaya pronitsaemost' khvoynykh porod drevesiny v diapazone chastot 3–12 GGts (The dielectric constant of coniferous wood in the frequency range 3–12 GHz), *Vestnik SibGAU*, 2013, No. 5(51), pp. 101–104.
- Kolesnikova A.A., Zakonomernosti izmeneniya vlazhnosti drevesiny eli vo vremeni (Spruce wood moisture content: patterns of changes over time), *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'*, 1998, No. 4, pp. 26–27.
- Kramer P.D., Kozlovskii T.T., *Fiziologiya drevesnykh rastenii* (Physiology of woody plants), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1983, 462 p.
- Leong E.-C., Burcham D., Yok-King F., A purposeful classification of tree decay detection tools, *Arbicultural Journal: The International J. Urban Forestry*, 2012, Vol. 34, No. 2, pp. 91–115.
- Leonov L.V., *Tekhnologicheskie izmereniya i pribory v lesnoi i derevoobrabatyvayushchei promyshlennosti* (Technological measurements and devices in the timber and woodworking industry), M.: Lesnaya prom-st', 1984, pp. 76–81.
- Lir K., Pol'ster G., Fidler G.I., *Fiziologiya drevesnykh rastenii* (Trees physiology), M.: Lesnaya prom-st', 1974, 423 p.
- Lorenzo H., Pérez-Gracia V., Novo A., Armesto J., Forestry applications of ground-penetrating radar *Forest Systems*, 2010., Vol. 19, No. 1, pp. 5–17.
- Luley C.L., *Wood decay fungi common to living urban trees in the Northeast and Central United States*, Naples: Urban Forestry, 2005, 61 p.
- Maï T.C., Razandratsima S., Sbartaï Z.M., Demontoux F., Bos F., Non-destructive evaluation of moisture content of wood material at GPR frequency, *Construction & Building Materials*, 2015, Vol. 77, pp. 213–217.
- Mattheck C.G., Breloer H., Field guide for visual tree assessment (VTA), *Arbicultural J.*, 1994, Vol. 18, pp. 1–23.
- Nicolotti G., Socco L.V., Martinis R., Godio A., Sambuelli L., Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees, *Journal of Arbiculture*, 2003, Vol. 29, No. 2, pp. 66–78.
- Nolet G., *A breviary of seismic tomography, imaging the Interior of the Earth and Sun*, Cambridge: Cambridge University Press, 2008, 360 p.
- Rabe C., Ferner D., Fink S., Schwarze F., Detection of decay in trees with stress waves and interpretation of acoustic tomograms, *Arbicultural Journal*, 2004, Vol. 28, No. 1–2, pp. 3–19.
- Razafindratsima S., Sbartaï Z.M., Demontoux F., Permittivity measurement of wood material over a wide range of moisture content, *Wood Science & Technology*, 2017, Vol. 51, No. 6, pp. 1421–1431.
- Rinn F., Schweingruber F.H., Schiir E., RESISTOGRAPH and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species, *Holzforschung*, 1996, Vol. 50, No. 4, pp. 303–311.
- Sahin H., Ay N., Dielectric properties of hardwood species at microwave frequencies, *Journal of Wood Science*, 2004, Vol. 50, pp. 375–380.
- Sambuelli L., Socco L.V., Godio A., Nicolotti G., Martinis R., Ultrasonic, electric and radar measurements for living trees assessment, *Bollettino di Geofisica Teoricaed Applicata*, 2003, Vol. 44, No. 3–4, pp. 253–279.
- Sato M., Yokota Y., Takahashi K., Grasmueck M., Landmine detection by 3D GPR system, *Proceedings of SPIE*, 2012, No. 8357, pp. 23–27.
- Satriani A., Loperte A., Proto M., Bavusi M., Building damage caused by tree roots: laboratory experiments of GPR and ERT surveys, *Advances in Geosciences*, 2010, Vol. 24, pp. 133–137.
- Shiping Z., Chunlin H., Yi S., Motoyuki S., 3D Ground penetrating radar to detect tree roots and estimate root biomass in the field, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, No. 6, pp. 5754–5773.
- Shortle W.C., Decaying Douglas-fir wood: Ionization associated with resistance to a pulsed electric current, *Wood Science*, 1982, Vol. 15, No. 1, pp. 29–32.
- Shvamm E.E., *Drevesinovedenie* (Wood science), Ekaterinburg: Ural'skii tsentr akademicheskogo obsluzhivaniya, 2011, 193 p.
- Sihvola A., Mixing rules with complex dielectric coefficients, *Subsurface Sensing Technologies & Applications*, 2000, Vol. 1, No. 4, pp. 393–415.
- Sudakova M.S., Kalashnikov A.Yu., Vladov M.L., Terent'eva E.B., Marchenko A.L., Sadurtdinov M.R., Poisk konstruktivnykh pustot v stroitel'nykh konstruktivnykh metodom georadiolokatsii (Detection of voids in engineering structures using GPR method), *Geotekhnika*, 2017b, No. 2, pp. 30–37.
- Sudakova M.S., Terent'eva E.B., Kalashnikov A.Yu., Poisk i opredelenie razmerov konstruktivnykh pustot s pomoshch'yu georadarnoi tomografii na primere dvukh kolonn (Searching and measurement of functional voids by means of GPR tomography by the example of two columns), *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2017a, Vol. 13, No. 1, pp. 94–109.

- Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P., Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, *Water Resource Research*, 1980, Vol. 16, pp. 574–582.
- Torgovnikov G., *Dielectric properties of wood and wood-based materials*, Berlin, Heidelberg, N.Y.: Springer-Verlag, 1993, 196 p.
- Tweeton D.R., Jackson M.J., Roessler K.S., *BOMCRATR: A curved ray tomographic computer program for geophysical applications*, Washington: U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, 1992, 39 p.
- Vladov M.L., Sudakova M.S., *Georadiolokatsiya: ot fizicheskikh osnov do perspektivnykh napravlenii* (Georadiolocation: from the physical basis to promising trends), M.: Geos, 2017, 240 p.
- Wessoly L., Fracture diagnosis of trees. Part 3: Boring is no way for reliable fracture diagnosis, *Stadt und Grün*, 1995, No. 9, pp. 635–640.
- Yanovskaya T.B., Porokhova L.N., *Obratnye zadachi geofiziki* (Reverse problems of geophysics), St. Petersburg: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo gos. universiteta, 2004, 216 p.
- Youn H., Chen C., Neural Detection for Buried Pipes Using Fully-Polarimetric Ground Penetrating Radar System, *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar*, 2004, Vol. 1, pp. 303–306.