

УДК 550.3

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-62-72

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАННЫХ ГЕОРАДАРНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ СКРИНИНГА СТВОЛОВ ДЕРЕВЬЕВ

Мария Сергеевна Судакова^{1✉}, Евгения Борисовна Терентьева²,
Иван Александрович Серёгин³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; m.s.sudakova@yandex.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; genia_teren@mail.ru

³ Российский государственный аграрный университет — МСХА им. Тимирязева, Москва, Россия; seregin@mail.ru

Аннотация. Данное исследование посвящено актуальной проблеме неинвазивной диагностики стволов деревьев с использованием технологии георадарной томографии. Основная цель исследования — выявление динамических атрибутов в необработанных записях георадара, которые могут достоверно указывать на наличие гнили или воздушных полостей внутри стволов деревьев. Исследование основано на данных томографии, полученных от 22 крупномерных лиственных деревьев в Парке Горького в Москве. Предложенный атрибут «Произведение параметра поглощения на расстояние» эффективно различает здоровые и пораженные гнилью деревья. Для здоровых деревьев этот атрибут демонстрирует положительные значения, в то время как для пораженных или полых деревьев значения отрицательные. Полученные результаты открывают новые перспективы для неинвазивной диагностики городских деревьев и могут применяться при крупномасштабном скрининге зеленых насаждений.

Ключевые слова: георадиолокация, неразрушающий контроль, атрибутный анализ, мониторинг деревьев, стволовая гниль

Для цитирования: Судакова М.С., Терентьева Е.Б., Серёгин И.А. Анализ динамических характеристик данных георадарной томографии для скрининга стволов деревьев // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 62–72.

ATTRIBUTE-BASED ANALYSIS OF GPR RAY-BASED TOMOGRAPHY DATA FOR TREE TRUNKS SCREENING

Mariya S. Sudakova^{1✉}, Evgeniya B. Terentyeva², Ivan A. Seregin³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, m.s.sudakova@yandex.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; genia_teren@mail.ru

³ Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia; seregin@mail.ru

Abstract. This study addresses the actual issue of non-invasive tree trunk diagnostics using ground-penetrating radar (GPR) tomography. The primary objective is to identify dynamic attributes in non-processed GPR data that can reliably indicate the presence of rot or air holes within tree trunks. The study is based on tomography data obtained from 22 large trees in Gorky Park, Moscow. The proposed “attenuation multiply to distance” attribute effectively distinguishes between healthy and rot-affected trees. For healthy trees, this attribute exhibits positive values, while for rotted or hollow trees, the values are negative. The obtained results open new perspectives for non-invasive diagnostics of urban trees and can be applied to large-scale screening of green spaces.

Keywords: ground-penetrating radar, non-destructive testing, attribute analysis, tree monitoring, stem rot

For citation: Sudakova M.S., Terentyeva E.B., Seregin I.A. Attribute-based analysis of GPR ray-based tomography data for tree trunks screening. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 62–72. (In Russ.).

Введение. Зеленые насаждения дают множество преимуществ, среди которых охлаждение атмосферы и улучшение качества воздуха [Roy et al., 2012; Mullaney et al., 2015]. Присутствие деревьев в городах способствует расслаблению и снятию стресса, а исследования показывают, что вид зеленых насаждений снижает физиологическую реакцию на стресс [Ulrich, 1986; Schroeder, 1989].

Однако ослабленные и больные деревья могут угрожать благополучию городов, что вызывает озабоченность специалистов лесного хозяйства и муниципалитетов. В исследовании, проведенном в США,

было выяснено, что на долю травм, связанных с деревьями, приходится 4,16% случаев госпитализации [Nakakian et al., 2018]. Внезапное падение деревьев, как из-за штормов, так и самопроизвольное, приводит к человеческим жертвам и порче имущества, чаще всего транспортных средств [Weyrauch, Gill, 2021; Byard, 2024].

Статистика по Москве и Московской области показывает, что только лишь за первые дни мая 2025 г., согласно пресс-релизу правительства, в результате непогоды количество упавших деревьев превысило 2 тысячи [Порядка..., 2025]. К сожалению, оценить

общее количество падений деревьев в Москве и Московской области на практике сложно, так как сводка по всему региону требует агрегирования данных разных не связанных ведомств: падения деревьев во дворах — зона ответственности управляющих организаций, вдоль дорог — региональных дорожных служб, а в лесфонде — Минлесхоза. Но одно несомненно — в мире все шире обсуждается усиление опасностей, связанных с деревьями, в связи с изменением климата, что создает риски для общественной безопасности [Portoghesi, et al., 2023].

Падение и слом деревьев объясняется, в первую очередь, гнилью стволов и дефектами корневой системы [van Haaften et al., 2021, Shi et al., 2023], наклоном ствола и неправильной конфигурацией кроны [Tirpner et al., 2019]. Среди всех этих факторов стволовая гниль является критическим для разрушения деревьев, согласно работе [Heineman et al., 2015]. Стволовая гниль снижает плотность древесины и структурную целостность, делая деревья более восприимчивыми к факторам окружающей среды [Koltunov, 2019]. Причем дерево не обязательно вырубать, так как даже в случае выявления гнили возможно продление жизни дерева при ранней диагностике и принятии адекватных мер, что особенно важно для исторически значимых деревьев [Терентьева, 2020].

При наличии гнили, перед вырубкой необходимо оценить прочность ствола. Для решения этой задачи, а также для оценки рисков падения, используются формулы, основанные на использовании соотношений диаметров ствола и пустот [Kane et al., 2001; Mattheck, Breloer, 1998; dos Reis et al., 2022; и др.]. В качестве оценки зоны риска деревьев с гнилью берется диапазон потери прочности 20–44% и в случае превышения 44% дерево считается аварийным [Coder, 1989].

Для выявления стволовой гнили, а также оценки ее размеров, традиционно используется сверление. Однако, кернение обеспечивает прямой доступ к внутреннему состоянию древесины, следовательно, оно является инвазивным и может инициировать дальнейшие процессы гниения [Helliwell, 2007]. Также недостатками подхода является ограниченность только одним направлением, причем точная привязка координат отбираемого образца весьма затруднительна.

Ввиду исключительной важности оценки пространственных размеров пустот и гнили, на первый план выходят методы, способные решить задачу двумерной или трехмерной оценки размеров внутренних аномалий ствола. Для этого применяются акустическая томография [Arciniegas et al., 2014], электрическая томография [Martin, Gunther, 2013; Nagrey, 2006; Soge et al., 2019], микроволновые и георадарные методы, которые могут обнаружить гниение, не повреждая дерево [Goh et al., 2018]. Однако, по-настоящему неинвазивными методами являются только методы, использующие радиоволны.

Изучение пустот и гнили в стволах живых деревьев с помощью георадара включает в себя несколько методик и приемов, включая применение георадара с совмещенным излучателем и приемной антенной (профилирование) [Chen et al., 2021; Alani et al., 2019; Tosti et al., 2020], а также георадарную томографию с разнесенными излучателем и приемной антенной [Терентьева и др., 2020, Sudakova et al., 2021]. При этом наилучшие результаты в определении площади полости на срезе ствола дает комбинированный подход, включающий в себя и томографию и профилирование для построения начальной модели для томографического расчета [Sudakova et al., 2025].

При обследовании деревьев важна не только точность определения наличия гнили и ее размеров, но и длительность цикла получения и обработки данных. Как показала практика, ни одна из модификаций применения георадара для стволов деревьев не удовлетворяет двум критериям одновременно: профилирование с совмещенными источником и приемником делается быстро, но не дает точных результатов, а томография дает точный количественный результат, но полные трудозатраты на одно дерево составляют несколько часов, что неприемлемо для массовой оценки.

Существующая потребность в новом подходе к интерпретации данных георадара, полученных на стволах деревьев в модификации совмещенных антенн, находят свое отражение в современных работах. Так, в одной из работ был только намечен подход к использованию атрибутного анализа применительно к стволам деревьев [Parnow et al., 2024], хотя атрибутный анализ уже второе десятилетие используется применительно к данным GPR в гляциологии [Navarro et al., 2016], археологии [Chiang et al., 2012] и строительстве [Morris et al., 2019].

В данной работе мы хотим сосредоточиться на поиске динамических атрибутов (или атрибута) необработанной записи георадара, полученной по томографической методике, которые бы давали однозначный ответ на вопрос: присутствует ли в стволе дерева гниль или даже воздушная пустота. Это значительно сократит трудозатраты на полевые исследования и обработку данных, и станет основой методики быстрого выявления опасных деревьев. В дальнейшем, если это целесообразно, ствол дерева может быть исследован с помощью более сложных методов.

Как показала наша практика, существующий кинематический признак присутствия неоднородностей в стволе дерева — негиперболичность годографа прямой волны, может быть связан с функциональными изменениями влажности внутри ствола или с его формой, а не со стволовой гнилью.

Теоретически, в процессе распространения через гнилую, трухлявую древесину, и/или воздушную полость внутри дерева, сигнал претерпевает значительно большее затухание, чем при распространении через древесину здорового ствола. Это должно

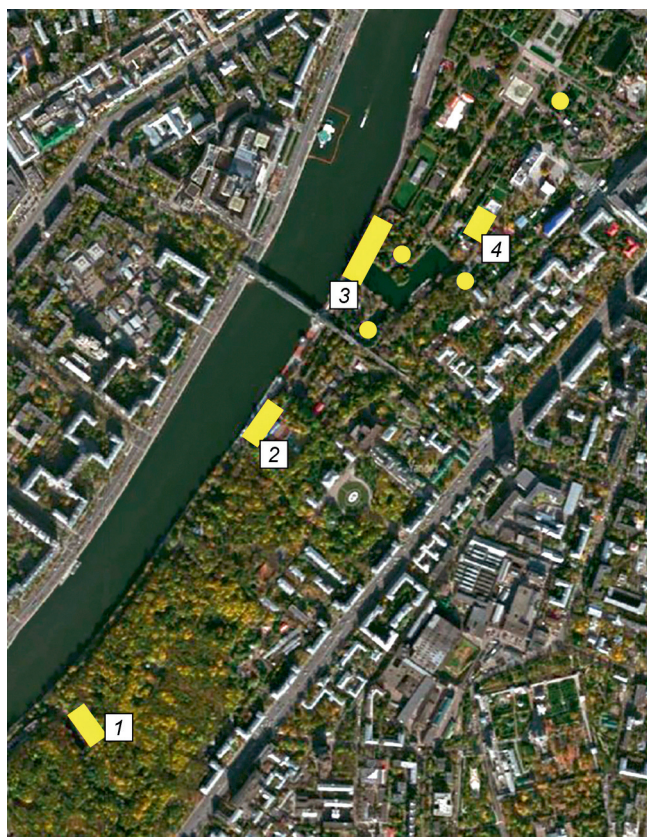


Рис. 1. Карта-схема территории пробоотбора (г. Москва): 1 — Екатерининский пруд парка им. Горького, 2 — театр Стаса Намина, 3 — Пушкинская набережная, 4 — фонтан «Девушка на буме»)

отразиться на его амплитудных и спектральных характеристиках.

При этом, в отличие от кинематических, динамические характеристики записи более подвержены влиянию таких факторов, как наличие шумов и помех, различие контакта антенн с поверхностью, неровность коры, интерференция различных волн, приповерхностные неоднородности и прочее.

Таким образом, для достижения цели выявления признака гнили на георадарной записи, необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать статистически независимые динамические атрибуты сигнала, прошедшего сквозь ствол дерева;
- выявить атрибут, позволяющий определить наличие или отсутствие стволовой гнили;
- определить число измерений, необходимых для получения устойчивого значения атрибута.

Материалом для данной работы послужили данные томографии, полученные летом 2024 г. в Парке имени Горького в Москве на 22 крупномерных лиственных деревьях. Все результаты были верифицированы прямыми методами: 20 стволов были прокернены с 2 сторон (северной и южной) на высоте исследования, 2 дерева были спилены.

Объект исследования, аппаратура и методика. Схема расположения участков с выделенными для исследования деревьями, показана на рис. 1. Все деревья были выбраны сотрудниками парка. Рас-

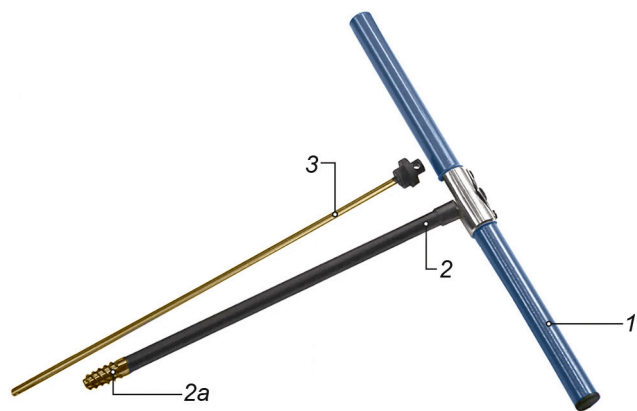


Рис. 2. Бурава: 1 — футляр, 2 — трубчатый корпус с хвостовиком (2a), 3 — экстрактор

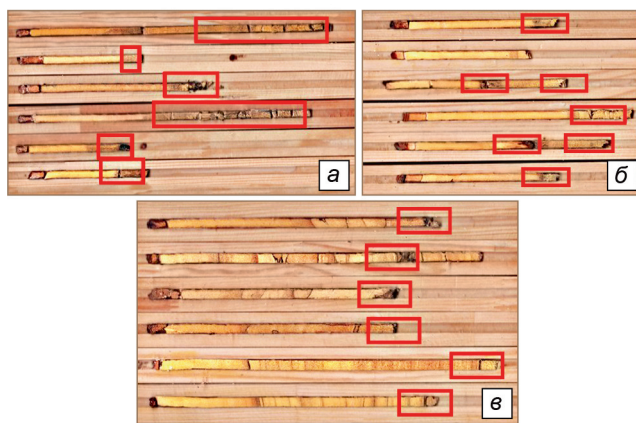


Рис. 3. Выявленные случаи отклонения: а — береза, б — липа, в — ива

пределение деревьев по видам и по радиусам стволов на высоте 140 см показано на рис. 4.

Под исследование были предоставлены следующие виды деревьев: Береза повислая (*Betula pendula*) — 3 дерева, Тополь черный (*Populus nigra*) — 4 дерева, Липа мелколистная (*Tilia cordata*) — 6 деревьев, Ива повислая (*Salix alba*) — 6 деревьев, Клен ясенелистный (*Acer negundo*) — 2 дерева. Визуально все деревья, кроме 2 лип, выглядят здоровыми.

В качестве контрольной проверки проводилось кернение с северной и южной сторон ствола дерева на высотах 60, 140 и 180 см. Отбор образцов осуществлялся с применением специализированного инструмента — буравы. Данный инструмент представляет собой футляр, трубчатый корпус с хвостовиком в виде шнека на конце и экстрактор — подложка, при помощи которой достают керн (рис. 2). Так как бурава позволяет получать керны до 35-ти см длиной, то радиус находился через уравнение окружности. Мощность древесины определялась с применением программного обеспечения «FiJi» с подключаемым плагином «ObjectJ».

По результатам кернения у одного дерева (береза, рис. 3, а) выявлена стволовая гниль, у трех деревьев (2 липы и 1 ива, рис. 3, б, в соответственно) воздушные полости внутри ствола, у всех тополей обнаружена сниженная плотность древесины ствола

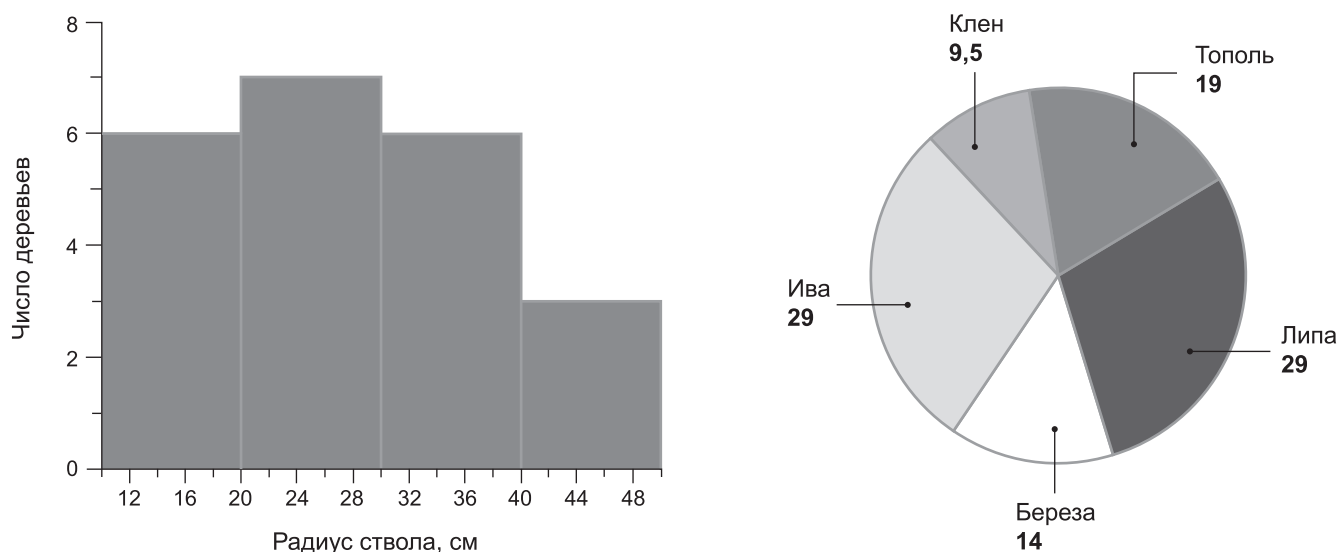


Рис. 4. Виды исследованных деревьев (а) и радиусы их стволов на высоте 140 см от дневной поверхности (б)

в сердцевине, 13 деревьев не имеют особенностей внутри ствола.

Диапазон радиусов стволов деревьев на высоте 140 см от земли составляет от 12 до 43 см (рис. 4). Из них деревьев с радиусом ствола от 10 до 20 см — 6 шт, от 20 до 30 см — 7 шт, от 30 до 40 см — 6 шт, от 40 до 50 см — 3 шт. Средний радиус ствола составил порядка 27 см.

Обследования деревьев проводились на высоте 140 см (рис. 5). Для обследования использовался георадар Zond-12e, антенны типа «бабочка». В качестве источника использовались антенна 1500 МГц, в качестве приемника — антенна 2000 МГц. Для двух тополей, радиус стволов которых составлял 35 и 41 см соответственно, в качестве источника использовалась антенна 900 МГц, в качестве приемника — антенна 1500 МГц.

В соответствии с томографической методикой, описанной в [Терентьева и др., 2020], шаг точек возбуждения составил 10 см, шаг точек приема после интерполяции составил 0,5 см. Привязка осуществлялась с помощью специальной мерной ленты, шаг привязки 10 см.

Излучающая и приемная антенны были ориентированы таким образом, чтобы оси диполей были параллельны друг другу и перпендикулярны направлению движения приемника.

Анализ данных. На рис. 6 представлены примеры данных георадарной томографии, полученных при исследовании стволов различных видов деревьев, находящихся в разных состояниях: береза, ива, липа, тополь. Данные подбирались таким образом, чтобы проиллюстрировать их вариативность.

Древесина лиственных пород в нормальном состоянии характеризуется скоростями порядка 6–8 см/нс, скорость в трухлявой древесине около 20 см/нс, скорость в воздухе 30 см/нс, а в гнилой древесине отличается от здоровой в 2 раза в меньшую сторону, т.е. составляет порядка 3,5–4 см/нс. Это позволяет выделить кинематические признаки



Рис. 5. Процесс работы с антеннами 1500 МГц (слева) и 2000 МГц (справа)

определения состояния ствола дерева по годографу волны, проходящей через ствол. Так, он будет гиперболической формы и не будет иметь значительных изломов, если древесина ствола в здоровом состоянии. Если внутри дерева труха или воздушная пустота, то форма годографа меняется (поднимается по центру). Если внутри дерева гниль (понижение влажности), то годограф волны будет «проседать» по центру радарограммы. Это проиллюстрировано на модельных и реальных данных в работе [Sudakova et al., 2025].

Однако, у этого правила существуют исключения, связанные как с формой ствола дерева, так и с внутренними особенностями его устройства (например, наличия вросших сучков). На рис. 6, а представлены данные, соответствующие вышеизложенным соображениям: ствол дерева без особенностей и годограф прямой волны имеет гиперболическую форму. На рис. 6, в, показаны данные, полученные на стволе дерева также без особенностей, однако, по центру годографа прямой волны видно «уплощение» годографа, что может говорить о возможном наличии трухлявости. Такой же кинематический признак (уменьшение времени прихода) виден на данных,

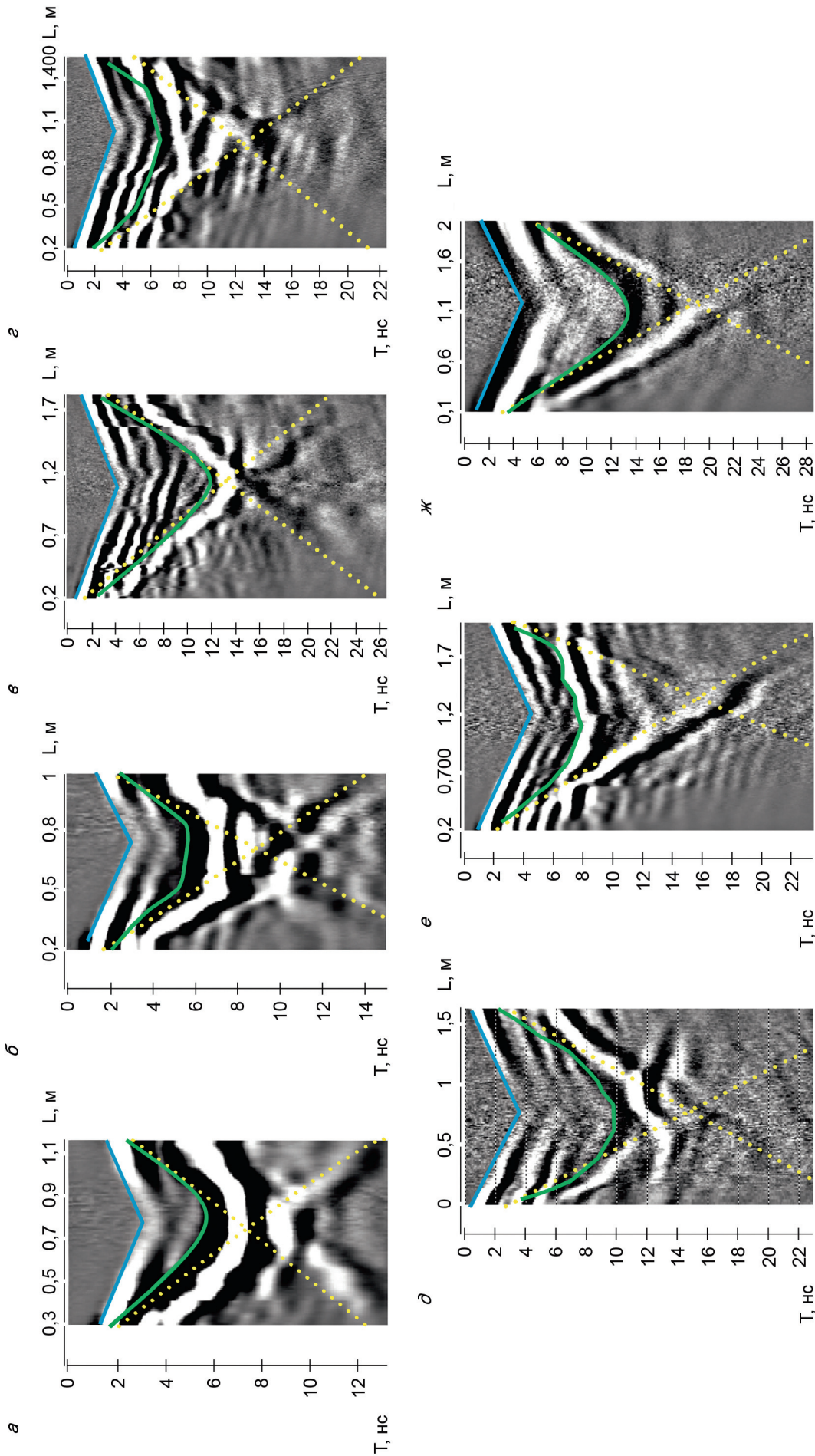


Рис. 6. Примеры данных георадарной томографии, полученных при исследовании стволов различных видов деревьев, находящихся в разных состояниях: *а* — береза здоровая, *б* — береза с выявленной гнилью внутри ствола, *в* — ива здоровая, *г* — ива с пустотой внутри ствола, *д* — липа здоровая, *е* — липа с пустотой внутри ствола, *ж* — тополь здоровый, выявлено уменьшение плотности древесины к сердцевине. Цветами показано: голубым — воздушная волна, желтым — прямая волна по коре вокруг ствола, зеленым — прямая волна через ствол. *L* — расстояние между источником и приемником вдоль ствола, *м*, *T* — время записи, *нс*

представленных на рис. 6, *з*, *е*, но это данные, полученные на стволах деревьев с подтвержденной воздушной пустотой.

Также на этих данных амплитуда волны видимо меньше, чем на данных, соответствующих здоровым деревьям (рис. 6, *а*, *в*), но видимое уменьшение амплитуды наблюдается и на рис. 6, *д*, *ж*, соответствующих стволам деревьев без выявленных гнили или трухлявости/пустоты. Причем годограф прямой волны на рис. 6, *ж*, имеет хорошо выраженную гиперболическую форму, но соответствует стволу тополя со сниженной плотностью в сердцевине, а годограф прямой волны на рис. 6, *д* соответствует стволу липы без особенностей, однако сам годограф имеет излом, природа которого не связана с негативными изменениями ствола.

Приведенные примеры иллюстрируют скорее исключительные случаи внутреннего устройства стволов деревьев (кроме рис. 6, *а*), однако, по ним становится понятно, что кинематические или хорошо видимые динамические признаки не могут быть достаточными для диагностики наличия или отсутствия гнили или пустоты внутри ствола во всех случаях.

Для поиска атрибута на данных георадиолокации, который бы с большой вероятностью позволял бы определить наличие каких-либо нежелательных дефектов внутри ствола, были рассчитаны значения следующих атрибутов волны, проходящей через ствол дерева (на рис. 6 показана зеленым цветом): A_{max} — максимальная амплитуда (по модулю) в окне, F_c — частота, отвечающая главному максимуму в спектре, BW — частотный диапазон (максимальная частота минус минимальная частота по уровню 0,5 от максимума спектра). Атрибуты рассчитывались в двух разных окнах: размер первого окна был равен одному видимому периоду сигнала, второго — полтора видимых периода. Для верификации результатов аналогичным образом рассчитывались атрибуты воздушной волны (на рис. 3 показана синим цветом). Расчет проходил в программе SeisPro 2025, с помощью модуля SSAA (Seismic Sequence Attribute Analysis — Сейсмический анализ атрибутов).

Далее были построены графики зависимости приведенных атрибутов от расстояния между источником и приемником во траектории вокруг ствола дерева. Примеры графиков приведены на рис. 7 (здоровый ствол дерева ива повислая) и рис. 8 (ствол ивы повислой, в котором была выявлена воздушная пустота). Графики зависимости амплитуды приведены в логарифмическом масштабе, графики спектральных характеристик — в линейном.

Наблюдается логарифмическая зависимость амплитуд волн от расстояния между источником и приемником. Были подобраны зависимости атрибута A_{max} от расстояния в экспоненциальном виде. Параметр затухания (степень при экспоненте, β) отрицательный, что соответствует современным представлениям о физике распространения волн

в материальных средах, и позволяет считать построенные зависимости корректными.

Значения параметров F_c и BW имеют дискретный вид; закономерности их изменения с расстоянием не наблюдается. Появление аномально высоких значений для прямой волны на больших расстояниях свидетельствуют о том, что здесь соотношение сигнал/шум меньше 1, и рассчитанные в заданном окне значения соответствуют шумовой компоненте. Очевидно, качество данных не позволяет определять спектральные характеристики в окне в автоматическом режиме, и определенные таким образом спектральные атрибуты не могут быть приняты в дальнейшую работу. Поэтому в дальнейшем анализировался только атрибут максимальная абсолютная амплитуда в окне, точнее рассчитанный параметр затухания β .

Минимальные, максимальные, средние и медианные значения параметров затухания β разных волн, измеренные в разных окнах приведены в таблице. Значения, полученные в разных окнах, не отличаются друг от друга более чем на 20%. Положительные значения параметра затухания соответствуют деревьям с радиусами стволов меньше 10 см и являются результатом недостаточного расстояния между источником и приемником для получения адекватного результата.

Таблица

Минимальные, максимальные, средние и медианные значения параметров затухания β разных волн, измеренные в разных окнах

Тип волны	Воздушная		Прямая (здоровые стволы)		Прямая (больные стволы)		Прямая (тополя)	
	1·Т	1,5·Т	1·Т	1,5·Т	1·Т	1,5·Т	1·Т	1,5·Т
β мин	-10,9	-8,3	-4,0	-3,3	-7,0	-6,9	-5,8	-5,7
β макс	-3,4	-2,7	2,3	2,3	-3,1	-3,1	-2,1	-2,0
β среднее	-6,3	-5,4	-0,5	-0,4	-4,9	-5,0	-4,0	-3,9
β медиана	-6,3	-5,5	-0,4	-0,5	-4,8	-5,0	-3,7	-3,8

В среднем, значения параметра затухания для прямой волны, прошедшей через ствол деревьев с выявленными дефектами (гниль, пустоты и уменьшение плотности древесины) на порядок больше (около -5), чем значение параметра затухания для здоровых деревьев (около -0,5), что позволяет использовать этот атрибут для ранжирования стволов. Однако, диапазоны рассчитанного параметра поглощения для полностью здоровых стволов и стволов деревьев с особенностями перекрываются, что говорит о необходимости поиска нового атрибута.

В качестве атрибута, который более однозначно показывал бы наличие или отсутствие проблемных участков внутри ствола, рассматривалось значение максимальной абсолютной амплитуды в окне, равном одному периоду, умноженное на расстояние между источником и приемником напрямую $\beta(A_{max} \cdot D)$.

Примеры графиков полученных зависимостей приведены на рис. 9. В итоге, для всех деревьев,

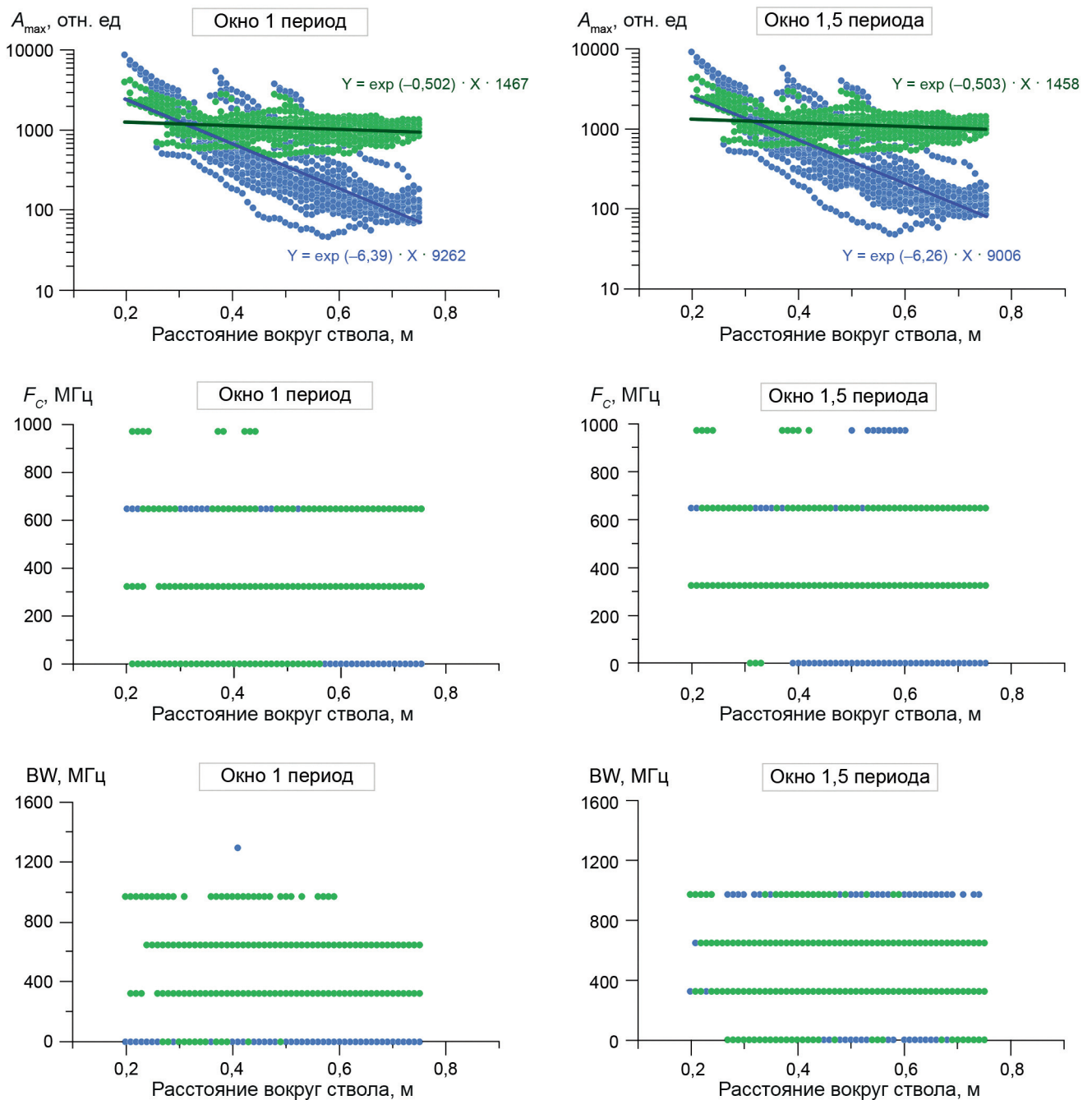


Рис. 7. Графики зависимости атрибутов воздушной и прямой волн от расстояния между источником и приемником по траектории вокруг здорового ствола ивы повислой: A_{\max} — максимальная абсолютная амплитуда (а), F_c — частота максимума спектра (б), BW — частотный диапазон (в)

в стволах которых не было выявлено каких-либо особенностей, параметр $\beta(A_{\max} \cdot D)$, посчитанный для всех положений источников и приемников, был больше 0; а для деревьев с выявленной гнилью, пустотой или уменьшением плотности к сердцевине — ниже нуля. То есть, данный атрибут, посчитанный для всех положений источников и приемников согласно методике, позволяет однозначно отличить здоровый ствол дерева.

Для выяснения, какого числа положений источников достаточно для получения такого результата, параметр $\beta(A_{\max} \cdot D)$ был рассчитан для всех данных,

полученных при одном положении источника. Результаты приведены в следующем разделе.

Результаты. Значения атрибута $\beta(A_{\max} \cdot D)$ для всех деревьев представлены на рис. 10. Кружками показаны значения, полученные для всех положений источников и приемников. Планками показаны предельные значения, полученные для ситуации одного обхода. Цветом показан результат кернения: зеленый — здоровая древесина, красный — выявлена пустота, синий — выявлена гниль, белый — тополь (выявлено уменьшение плотности к сердцевине).

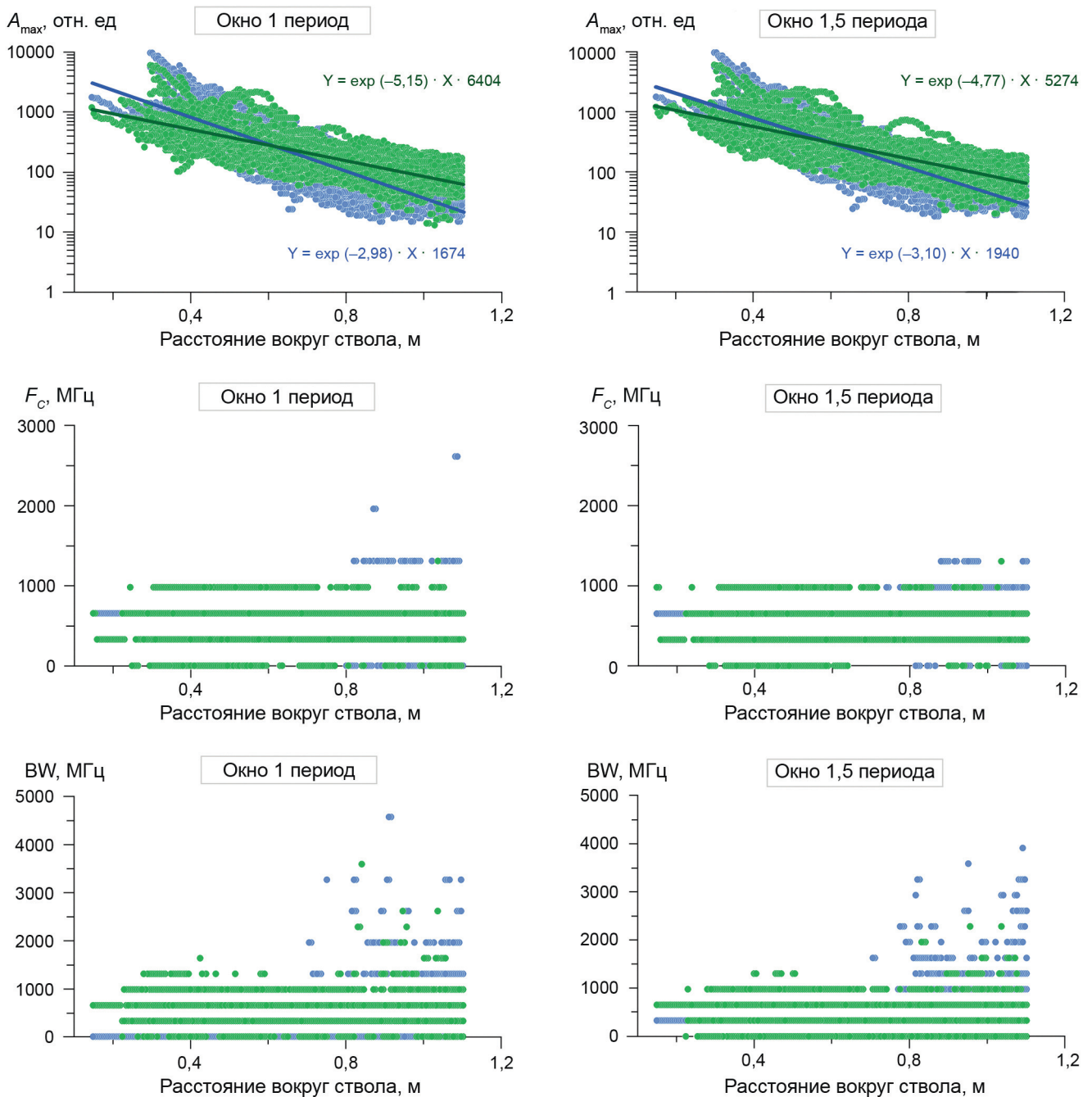


Рис. 8. Графики зависимости атрибутов воздушной и прямой волн от расстояния между источником и приемником по траектории вокруг большого ствола ивы повислой: A_{max} — максимальная абсолютная амплитуда (a), F_c — частота максимума спектра (b), BW — частотный диапазон (θ)

Почти все здоровые деревья, за исключением одного, имеют стволы радиусом меньше 30 см. Это частично объясняется непосредственной связью между возрастом дерева, толщиной его ствола, и подверженности болезням [Fu, et al., 2024].

Для всех деревьев со здоровыми стволами значения атрибута $\beta(A_{max}; D)$ для всех точек измерений больше нуля, для 9 деревьев из 12 этот результат сохраняется и для всех одиночных проходов. Среднее значение числа проходов для всех деревьев с положительным значением атрибута составляет порядка 90%.

Для всех деревьев с выявленными воздушными полостями значения атрибута $\beta(A_{max}; D)$ меньше нуля и это значение получено для всех одиночных атрибутов. Для березы с выявленной внутренней гнилью значение атрибута $\beta(A_{max}; D)$, рассчитанного для всех положений источников и приемников, также отрицательно, однако такое значение получено только для 15 из 20 проходов (75%).

Для трех тополей из 5 значение атрибута $\beta(A_{max}; D)$, рассчитанного для всех точек измерений, также отрицательно, однако оно может быть другого знака при одиночных проходах. Среднее значение

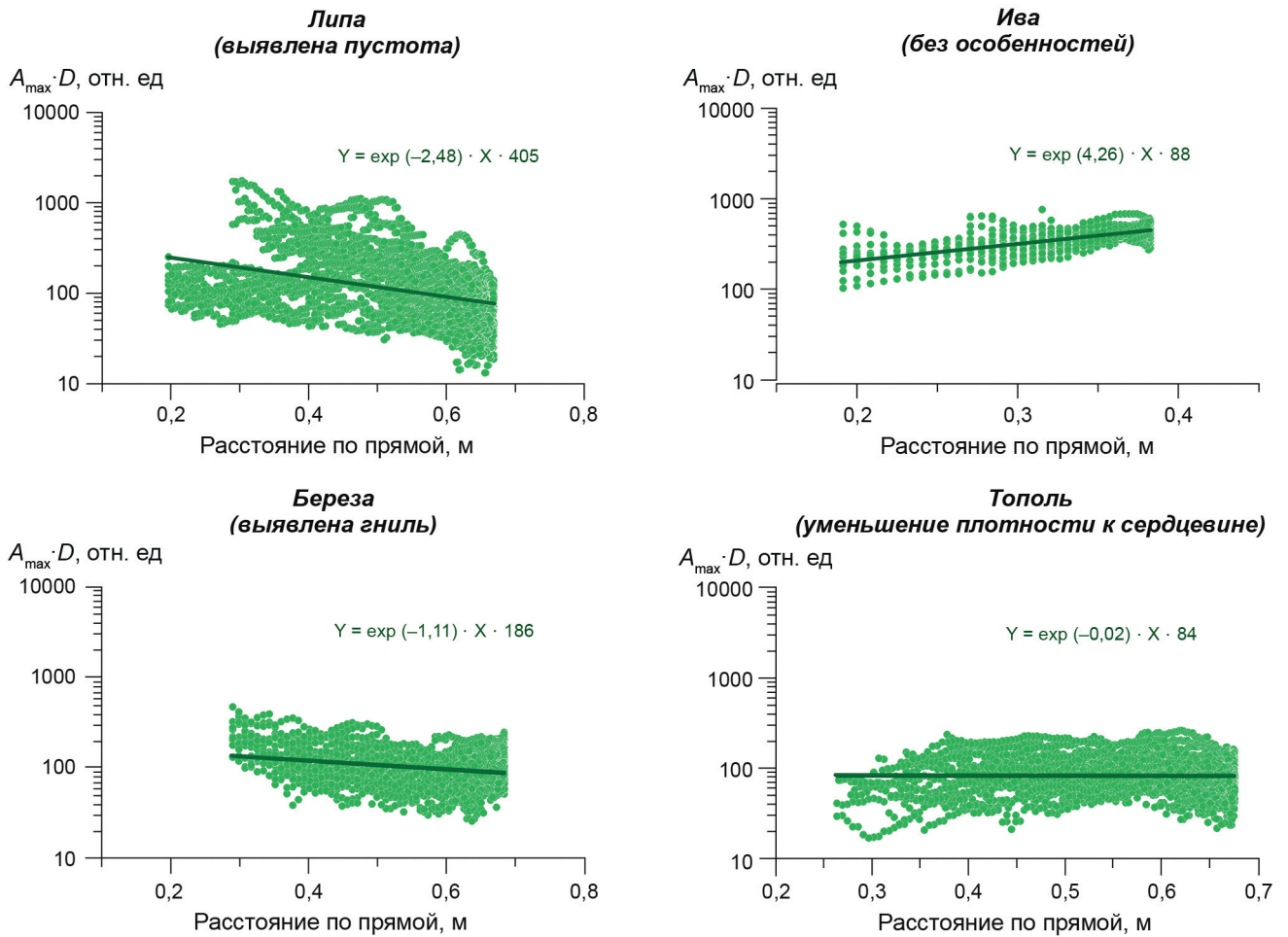


Рис. 9. Графики зависимости максимальной абсолютной амплитуды в окне, равном одному периоду, умноженной на расстояние между источником и приемником напрямую ($A_{\max} \cdot D$) от расстояния между источником и приемником напрямую (D)

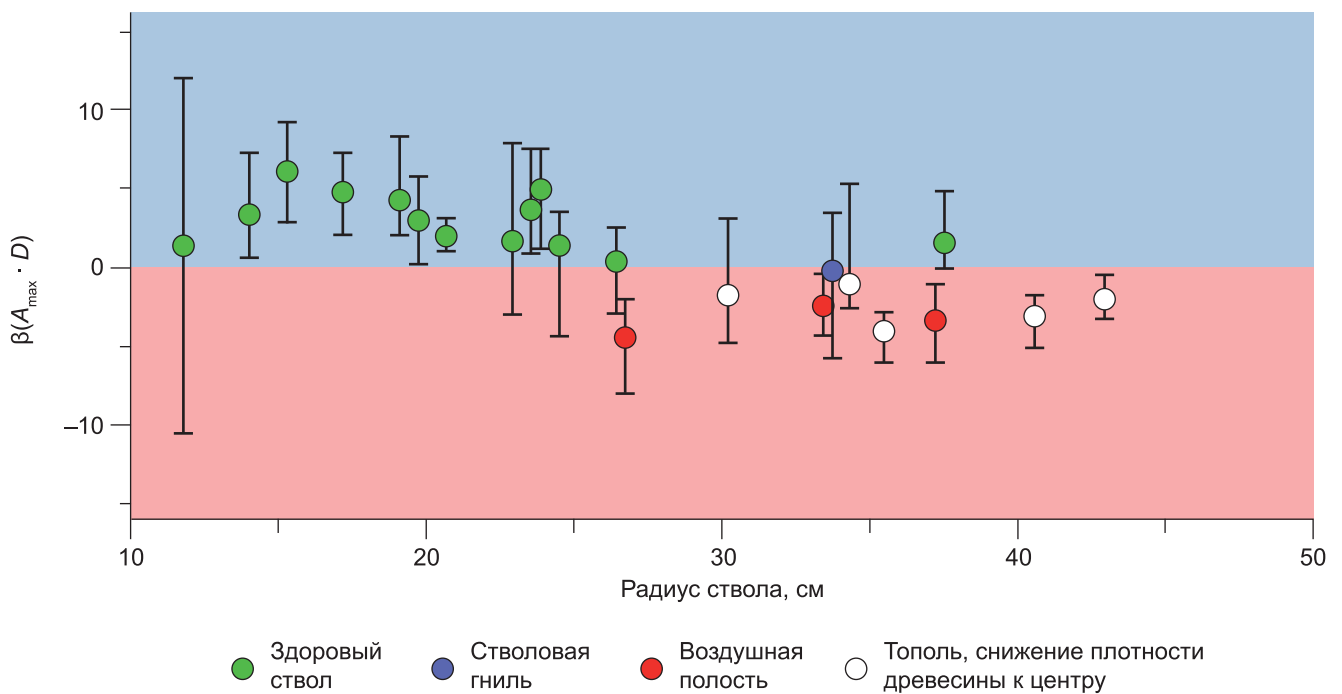


Рис. 10. Степень экспоненты зависимости амплитуды прямой волны от расстояния между источником и приемником для стволов деревьев разной толщины. Кружком показано значение, полученное для всех положений источников и приемников. Линиями показаны предельные значения, полученные для ситуации одного обхода

числа проходов для всех тополей с отрицательным значением атрибута составляет порядка 85%.

Выводы. В данной работе анализировались атрибуты записи георадарной томографии: центральная частота, полоса пропускания и максимальная абсолютная амплитуда.

Результаты показали, что спектральные атрибуты не могут быть приняты в дальнейшую работу, так как качество данных не позволяет адекватно определять спектральные характеристики сигналов на необработанных записях в окне в автоматическом режиме.

Из атрибута максимальная амплитуда в окне, равном одному периоду сигнала, были рассчитаны значения параметра затухания для прямой волны, прошедшей через ствол деревьев с выявленными дефектами (гниль, пустоты и уменьшение плотности древесины) на порядок больше (около -5), чем значение параметра затухания для здоровых деревьев (около $-0,5$), что позволяет использовать этот атрибут для ранжирования стволов. Однако, диапазоны рассчитанного параметра поглощения для полностью здоровых стволов и стволов деревьев с особенностями перекрываются, поэтому был рассмотрен атрибут значение максимальной

абсолютной амплитуды в окне, равном одному периоду, умноженное на расстояние между источником и приемником напрямую $\beta(A_{\max} D)$.

Результаты исследования показали, что значения атрибута $\beta(A_{\max} D)$, рассчитанные для всех положений источников и приемников, однозначно свидетельствуют об отсутствии дефектов внутри ствола дерева. В случае одного прохода вокруг ствола здорового дерева вероятность положительного значения атрибута $\beta(A_{\max} D)$ составляет порядка 90%.

Отрицательные значения атрибута $\beta(A_{\max} D)$, рассчитанные для всех положений источников и приемников, соответствуют стволам деревьев с выявленными дефектами по кернению. Причем, это могут быть как и терминальные дефекты (гниль, воздушная полость), так и дефекты, соответствующие живой древесине (уменьшение плотности к центру). Полученное для одного прохода отрицательное значение, не может однозначно свидетельствовать о наличии дефекта внутри ствола дерева.

Таким образом, в случае получения отрицательного значения атрибута $\beta(A_{\max} D)$ на полевой записи одиночного прохода рекомендуется проведение полного цикла георадарной томографии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Порядка 2 тыс. поваленных деревьев ликвидировали в Подмосковье за сутки // Новости Подмосковья. 3 мая 2025 г. 14:35. <https://mosreg.ru/sobytiya/novosti/news-submoscow/poryadka-2-tys-povalennykh-derevev-likvidirovano-v-podmoskove-za-sutki> (дата обращения: 24.12.2025).

Темнухин В.Б. Как лечить раны у деревьев. Методическое пособие. Н. Новгород: НОСЭОО «Зеленый мир», 2019. 28 с.

Терентьева Е.Б., Судакова М.С., Калашиников А.Ю. Опыт применения георадарной томографии при изучении стволов деревьев // Лесоведение. 2020. № 3. С. 274–286.

Alani A.M., Soldovieri F., Catapano I., et al. The use of ground penetrating radar and microwave tomography for the detection of decay and cavities in tree trunks // Remote Sens. 2019. Vol. 11. <https://doi.org/10.3390/rs11182073>.

Arciniegas A., Prieto F., Brancheriau L., et al. Literature review of acoustic and ultrasonic tomography in standing trees // Trees. 2014. Vol. 28. P. 1559–1567.

Butnor J.R., Doolittle J.A., Kress L., et al. Use of groundpenetrating radar to study tree roots in the southeastern United States // Tree Physiol. 2001. Vol. 21. P. 1269–1278.

Byard R.W. Tree failure — A natural phenomenon with forensic implications // Forensic Sci. Med. Pathol. 2024. Vol. 31. P. 624–627.

Chen S.L., Liu S.T., Lin C.H., Liu C.C. Application of ground-penetrating radar for living trees detection // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. Vol. 706 (1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/706/1/012008>.

Coder K.D. Should you or shouldn't you fill tree hollows? // Grounds Maint. 1989. Vol. 24(9). P. 68–70.

dos Reis M.N., Gonçalves R., Brazolin S., de Assis Palma S.S. Strength loss inference due to decay or cavities in tree trunks using tomographic imaging data applied to equations proposed in the literature // Forests. 2022. Vol. 13. <https://doi.org/10.3390/f13040596>

Fu Q., Qiu E., Zhang Y., et al. Mechanisms of trunk cavity formation of large old trees in urban landscapes: A case study

on four tree species in Beijing // Ecological Indicators. 2024. Vol. 158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111388>.

Hagrey A.S. Electrical resistivity imaging of tree trunks // Near Surface Geophysics. 2006. Vol. 4. № 3. P. 179–187.

Hakakian D., Del Rosario A.G., Bogdanovski D.A., et al. Analysis of injury patterns due to tree-related trauma // Am. Surg. 2018. Vol. 84 (9). P. 407–410.

Heineman K.D., Russo S.E., Baillie I.C., et al. Evaluation of stem rot in 339 Bornean tree species: implications of size, taxonomy, and soil-related variation for aboveground biomass estimates // Biogeosciences. 2015. Vol. 12. P. 5735–5751.

Helliwell D.R. A short note on effects of boring holes in trees // Arboricult. J. 2007. Vol. 30 (3). P. 245–248.

Goh C.L., Abdul Rahim R., Fazalul Rahiman M.H., et al. Sensing wood decay in standing trees: A review // Sensors Actuators A Phys. 2018. Vol. 269. P. 276–282.

Kane B., Ryan D., Bloniarz D.V. Comparing Formulas that assess strength loss due to decay in trees // J. Arboric. 2001. Vol. 27. P. 78–86.

Koltunov E.V. Features of the stem and root rot distribution in urban woody plants and forest parks // Forests of Russia and economy in them. Ural State Forestry University. 2019. № 2 (69). P. 37–44.

Martin T., Gunther T. Complex resistivity tomography for fungus detection on standing oak trees // Eur. J. For. Res. 2013. Vol. 132 (5–6). P. 765–766.

Mattheck C., Breloer H. The body language of trees: a handbook for failure analysis. The Stationery Office. London, England, 1998. 240 p.

Morris I., Abdel-Jaber H., Glisic B. Quantitative attribute analyses with GPR for concrete characterization // Sensors. 2019. Vol. 11. doi:10.3390/s19071637.

Mullaney J., Lucke T., Trueman S.J. A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments // Landsc. Urban Plan. 2015. Vol. 134. P. 157–166.

Parnow S., Lantini L., Uzor S., Tosti F. Enhancing Tree Management Practices by Extracting GPR Attributes for the Evaluation of Tree Trunk Internal Structures // EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, EGU24-11475, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-11475>.

Portoghesi L., Masini E., Tomao A., Agrimi M. Could climate change and urban growth make Europeans regard urban trees as an additional source of danger // *Front. For. Glob. Chang.* 2023. Vol. 6. P. 1–12.

Roy S., Byrne J., Pickering C. A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones // *Urban For. Urban Green.* 2012. Vol. 11 (4). P. 351–363.

Schroeder H.W., Zube E.H., Moore G.T. Environment, behaviour, and design research on urban forests // *Adv. Environ. Behav. Des.* 1989. P. 87–117.

Shi F., Meng Q., Pan L., Wang J. Root damage of street trees in urban environments: An overview of its hazards, causes, and prevention and control measures // *Sci. Total Environ.* 2023. Vol. 904. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166728>.

Soge A.O., Popoola O.I., Adetoyinbo A.A. A four-point electrical resistivity method for detecting wood decay and hollows in living trees // *European Journal of Wood and Wood Products.* 2019. Vol. 77. P. 465–474.

Sudakova M., Terentyeva E., Kalashnikov A. Assessment of health status of tree trunks using ground penetrating radar tomography // *AIMS Geosci.* 2021. Vol. 7. P.162–179.

Sudakova M.S., Terentyeva E.B., Soldatenko A.M., et al. Determining the size of internal air cavities in linden (*Tilia Europaea*) trunks via ground penetrating radar // *Journal of Applied Geophysics.* 2025. Vol. 240. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105761>.

Tippner J., Praus L., Brabec M., Sebera V., et al. Using 3D digital image correlation in an identification of defects of trees subjected to bending // *Urban For. Urban Green.* 2019. Vol. 46. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126513>.

Tosti F., Gennarelli G., Lantini L., et al. Assessing the Internal Structure of Hollow Trees Using GPR and Microwave Tomography // 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Milan, Italy, 2020, P. 453–456. doi: 10.1109/TSP49548.2020.9163459.2020.

Ulrich R.S. Human responses to vegetation and landscapes // *Landsc. Urban Plan.* 1986. Vol. 13. P. 29–44.

van Haaften M., Liu Y., Wang Y., et al. Understanding tree failure—A systematic review and meta-analysis // *PLoS One.* 2021. Vol. 16 (2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246805>.

Weyrauch D., Gill J.R. Accidental deaths involving trees: professional and nonprofessional woodcutting and tree failures with autopsy findings // *Am. J Forensic Med Pathol.* 2021. Vol. 42 (4), P. 350–353.

Статья поступила в редакцию 29.10.2025,
одобрена после рецензирования 12.11.2025,
принята к публикации 27.02.2026