

Критерии картирования и оценки корневых систем методом георадиолокации на примере ели европейской*

П. А. Рязанцев¹, А. В. Кабонен²

¹ Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН,
Российская Федерация, 185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11

² Петрозаводский государственный университет,
Российская Федерация, 185910, Петрозаводск, пр. Ленина, 33

Для цитирования: Рязанцев, П. А., Кабонен, А. В. (2024). Критерии картирования и оценки корневых систем методом георадиолокации на примере ели европейской. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 69 (2), 251–273.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.203>

В статье обсуждаются подходы к использованию методов георадиолокации для описания корневых систем деревьев и контроля их состояния в городской среде. Цель исследования заключалась в картировании и определении достоверности оценки корневых систем деревьев в естественном залегании методом георадиолокации. В качестве объекта исследований выделена отдельно стоящая ель европейская (*Picea abies* (L.) H. Karst.), под которой был заложен полигон съемки размером 4 × 4 м. Для повышения детальности полевая съемка выполнялась георадаром с высокочастотным антенным блоком 1700 МГц. Анализировалось влияние сети наблюдений в зависимости от пространственной ориентации на получаемые данные о корневой архитектонике. Съемка по прямоугольной и диагональной сети с шагом 25 см показала разное количество дифрагированных волн, выступающих маркером отдельных корней. Обнаружена закономерность распределения таких волн по глубине, соответствующая особенностями роста обследуемого дерева. Для верификации георадарных данных была выполнена полная экскавация корней ели с детальным ручным описанием. Установлено что крупные корни обладают характерными георадарными паттернами, которые уверенно прослеживаются на серии параллельных профилей. Проанализирован отраженный сигнал для корней, на основе чего показана взаимосвязь между их диаметром и временной протяженностью волнового цуга с коэффициентом корреляции $r = 0.87$. По итогам обследования ели европейской георадарные данные позволили восстановить корневую архитектонику в естественном залегании и определить критерии для поиска наиболее крупных скелетных корней. Несмотря на имеющиеся проблемы, связанные с параметризацией корней, полученные результаты свидетельствуют о возможности получения принципиально новой информации в отношении строения и функционирования корневых систем деревьев.

Ключевые слова: георадарные атрибуты, дифрагированная волна, методика наблюдений, корневая архитектоника, диаметр корня.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Отдела комплексных научных исследований КарНЦ РАН.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2024

1. Введение

1.1. Актуальность неразрушающей диагностики корневых систем

Корневая система растений — сложный и адаптивный природный объект, являющийся критически важным органом любого дерева, она отвечает за функции питания, запасаания питательных веществ и физического закрепления в грунте. Конфигурация корней в пространстве — архитектура корней — формируется под воздействием множества природных факторов, например вида растения, типа и структуры вмещающих почв, получаемого питания, климатических условий и многого другого. Анализ корневой архитектуры служит неотъемлемой составляющей исследований по фундаментальным вопросам онтогенеза и адаптации растений, продуктивности агрокультур, лесопользования (Колесников, 1972; Калинин, 1991; Gregory, 2006; Eshel and Beeckman, 2013).

На сегодняшний день особого внимания требуют древесные насаждения в городской среде, так как они находятся в зоне высоких рисков и часто подвергаются экологическим стрессам и механическим повреждениям. Поскольку большая часть корней концентрируется в верхней части почв, заглубленные инженерные конструкции и коммуникации выступают в качестве корнепроницаемых барьеров и могут служить причиной трансформации корневой системы (Zanetti et al., 2011a). Кроме того, выполнение земляных работ приводит к нарушению целостности и сокращению количества корней, что уменьшает механическую устойчивость деревьев и зачастую приводит к их гибели (Sani et al., 2012). Несмотря на то что здоровое дерево выдерживает удаление до 50 % корней, его устойчивость уменьшается, если корни отрублены с одной стороны или развитие корневой системы асимметрично (Mickovski and Ennos, 2003). Исследование подобных сценариев особенно важно в условиях плотной городской застройки, где пространство для роста растений ограничено, почвенные условия не оптимальны, что приводит к образованию неглубоких или деформированных корневых систем (Ghani et al., 2009), а падение деревьев во время сильных ветров — фактор риска для жизни и здоровья жителей.

Существует большое количество работ по изучению морфологии и структуры корневых систем (Fourcaud et al., 2008; Venetier et al., 2015), в том числе и с использованием трехмерного моделирования (Atkinson et al., 2019; Montagnoli et al., 2020). Однако остается проблема оценки корневых систем, связанная в том числе с их архитектурой — пространственной структурой основных групп корней в почве. В отечественной литературе по морфологическим признакам выделяются два основных типа корневых систем — стержневая и мочковатая (Калинин, 1991). В зарубежной литературе можно найти четыре шаблона: плитообразная, стержневая, сердцеподобная и грузилоподобная (Köstler et al., 1968). При этом отмечается, что представленные классификации слишком ограничены для всестороннего описания корневых систем, так как обилие внешних и внутренних факторов приводит к разнообразию их архитектуры (Venetier et al., 2015; Zanetti et al., 2015). Например, рост корней может адаптироваться к условиям окружающей среды, чтобы компенсировать изначально дефектное развитие и смягчить внешние воздействия, такие как регулярная ветровая нагрузка (Lundström et al., 2007) или произрастание на склонах (Danjon et al., 2013).

Многими авторами подчеркивается, что для решения подобных задач перспективны неразрушающие методы, преимущественно методы геофизики (Mancuso, 2012). При обследовании корневых систем и вмещающих их почв наиболее популярны методы, основанные на изучении электромагнитных полей и сигналов (Allred et al., 2008; Rodríguez-Robles et al., 2017). Выполняются экспериментальные работы по дистанционному определению размеров отдельных скелетных корней (Tanikawa et al., 2013; Guo et al., 2015; Yamase et al., 2018), оценке их плотности и биомассы (Amato et al., 2008; Borden et al., 2014; Postic and Doussan, 2016). Кроме того, проводится геофизическое изучение процессов микробиальной деятельности в области ризосферы (Repo et al., 2014) и определение признаков для фенотипирования корней в естественном залегании (Shanahan et al., 2015; Whalley et al., 2017). Однако нужно принимать во внимание то, что большинство исследований корневых систем геофизическими методами имеют в своей основе лабораторные наблюдения (Zanetti et al., 2011b; Delgado et al., 2019) или полевые эксперименты в относительно однородных почвенных условиях (Liu et al., 2019; Guo et al., 2020).

До сих пор не предложена утилитарная технология для оперативного получения информации о пространственном строении и функционировании корневых систем с учетом видового разнообразия деревьев и широкой изменчивости вмещающих почв. Геофизические методы, несмотря на доказанную эффективность, не внедрены в практику мониторинга зеленых насаждений. Причины этого: 1) недостаточная изученность корней с точки зрения геофизических параметров; 2) нехватка обоснованных критериев оценки состояния системы «корни — почвы» по данным геофизических методов; 3) проблема масштабирования достигнутых научных результатов и их практическое применение в сложных природных и техногенных обстановках. В условиях все возрастающей урбанизации представляется весьма актуальным совершенствование протоколов геофизического мониторинга корневой системы деревьев на городских территориях в качестве средства прогноза экологических рисков, связанных с нарушениями функционирования почв и зеленых насаждений в мегаполисе.

1.2. Изучение корневой архитектоники методом георадиолокации

Одним из наиболее эффективных методов для изучения корневой архитектоники служит георадиолокация из-за большой производительности, что обеспечивает высокую плотность данных, а также относительно высокой разрешающей способности (Guo et al., 2013; Alani and Lantini, 2020). В волновом поле георадиолокации корни в массиве почв выступают в качестве локальных объектов, на которых формируется выраженный поисковый признак — дифрагированная волна. Для описания корневых систем георадиолокацию начали применять с конца 1990-х годов (Hruška et al., 1999). Дальнейшие исследования в этом направлении убедительно показали возможность определения диаметра скелетных корней и оценки их биомассы (Butnor et al., 2001; Stover et al., 2007). При этом значительная часть работ касается физических ограничений и разрешающей способности метода (Barton and Montagu, 2004; Hirano et al., 2009). Нормальное значение относительной диэлектрической проницаемости для сухой (влажность менее 30 %) древесины не более 10, тогда как древесина с влажностью 80–90 % имеет значения до 50 единиц

(Torgovnikov, 1993). Для сравнения: нормальные значения относительной диэлектрической проницаемости песка составляют 4–7 в сухом состоянии и 5–15 во влажном. Этот контраст и обуславливает отражение коней в волновом поле георадиолокации. Характерные дифрагированные волны от корней формируются при разнице во влажности между корнями и почвами более 35 %, при разнице менее 20 % корни не выявляются (Guo et al., 2013; Yeung et al., 2016).

В лабораторных условиях неоднократно определялось, каким образом изменится волновое поле георадиолокации и какая возникает дифрагированная волна в зависимости от диаметра и глубины залегания корня (Hirano et al., 2009; Cui et al., 2011; Guo et al., 2013; Yeung et al., 2016). Однако вариации в расположении, диаметре и протяженности корней у деревьев разных видов затрудняют получение универсальных критериев для их идентификации. Отмечается, что минимальный диаметр корней, который может быть однозначно зафиксирован высокочастотными антенными блоками, составляет 0.5 см (Stover et al., 2007; Hirano et al., 2009; Cui et al., 2011), хотя последние работы указывают на возможность описания и более тонких корней (Liu et al., 2018). По существующим оценкам при помощи георадара можно выявить расположение порядка половины корней из общей структуры корневой системы дерева (Borden et al., 2017; Yamase et al., 2018).

Следует отметить, что электрофизические свойства корней исследованы крайне неравномерно. Например, относительная диэлектрическая проницаемость древесины определялась в первую очередь в контексте промышленного контроля влажности (Torgovnikov, 1993), тогда как параметры живых древесных органов исследованы ограниченно. В зависимости от сезона корни несут больше или меньше электрических зарядов, потому что древесный сок имеет переменный состав, а его движение различается по интенсивности и направлению (Mary et al., 2016; Ehosioke et al., 2020). Процессы гниения и разложения древесины также находят свое отражение в электромагнитных полях (Martin, 2012). Установлено существование видовых различий для удельной электропроводности корней, связанное с организацией порового пространства в их древесине (Zanetti et al., 2011b). На электрическую поляризацию влияют такие факторы, как состав корневой ткани и метаболическое состояние растения (Ehosioke et al., 2020). Изучение структуры древесины с использованием георадарного антенного блока с частотой 1600 МГц показало, что ориентация волокон определяет скорость георадарного сигнала, его амплитуду и частотный спектр (Martínez-Sala et al., 2013). Вследствие этого параметризация корней при интерпретации геофизических наблюдений представляет собой нетривиальную научную задачу. Крайне важно понимание параметров среды для интерпретации данных в случае неоднородных городских условий с подземной инфраструктурой (Altdorff et al., 2019).

Как уже отмечалось, большинство экспериментов по геофизическому изучению корней было проведено лабораторно или в естественных условиях по относительно небольшой выборке. Из-за нехватки практических наблюдений и отсутствия систематизации геофизических параметров корней с учетом их типа и условий произрастания существует проблема однозначного определения параметров корневой архитектоники с использованием данных георадиолокации. В представленной работе демонстрируется исследование корневой системы ели европейской (*Picea abies* (L.) H. Karst.). Было оценено влияние разной конфигурации сети георадарной съемки

на локацию позиции и толщины отдельных скелетных корней дерева по вершинам дифрагированной волны, а также проанализированы динамические параметры отраженного сигнала. Для верификации полученных георадарных данных выполнена экскавация всего массива корней с последующим детальным описанием.

2. Методика исследований и фактический материал

2.1. Объект исследований

Экспериментальные работы были проведены в июле 2020 г. на территории Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (подзона среднетаежных лесов). Географические координаты участка — 61°84' с. ш., 34°41' в. д. Территория Ботанического сада представляет собой ось антиклинальной складки, выраженной в современном рельефе в виде мощного крутосклонного кряжа субширотного простирания (Демидов и Лукашов, 2001). В четвертичных отложениях территории преобладают супесчаная и песчаная морена. Характерной особенностью исследуемого участка является близкое залегание скальных пород (50–100 см), что оказывает дополнительное влияние через ветровую нагрузку на ветроустойчивость деревьев с любым типом корневой системы. Ранее в Ботаническом саду проводились работы с привлечением метода георадиолокации по изучению влияния глубины кровли скальных пород на развитие корневой архитектоники деревьев (Рязанцев и др., 2020).

Для эксперимента на ровном участке было выбрано отдельно стоящее дерево ели европейской (*Picea abies* (L.) Н. Karst.) в возрасте 34 года (по количеству годичных колец), с высотой 17 м и диаметром ствола у корневой шейки 47 см. Выбор такого объекта исследований обусловлен необходимостью определения характера развития корневой системы ели в условиях произрастания в подзоне среднетаежных лесов при близком залегании коренных пород. Из литературных источников (Калинин, 1991) известен эффект специфического протекания процессов корнеобразования в зависимости от почвенно-гидрологических условий, почвенного покрова малой мощности и наличия корненепроницаемого горизонта. В результате происходит прекращение развития стержневого корня с интенсификацией роста корней горизонтальной ориентации, а структура корневой системы принимает выраженный поверхностный характер. Кроме того, невозможность проникновения вертикальных корней вглубь не только меняет структуру корневой системы, но и может повлечь за собой слабый рост надземной части, повышенную ветровальность и раннее отмирание деревьев (Колесников, 1972). Непосредственно для ели европейской при произрастании в неблагоприятных условиях установлена потеря порядка ветвления, переход к крупнокорневой структуре и нарушение общей симметрии (Puhe, 2003).

Полевые наблюдения выполнялись исходя из имеющихся данных о строении корневой системы ели европейской. Для этого вида характерна поверхностная корневая система в виде горизонтальной проекции четырех перпендикулярных и четырех диагональных скелетных корней на глубине от 20 до 40 см. Имеющиеся предпосылки указывают на применимость георадиолокации для сбора данных, так как глубина залегания большей части корней у ели европейской соотносится с глубиной зондирования высокочастотного антенного блока.

2.2. Методика исследований

Для выполнения работ на площадке под отдельно стоящей елью европейской был размечен квадратный полигон 4×4 м с основанием древесного ствола в центре, в пределах которого с шагом 25 см была размечена прямоугольная сеть профилей (рис. 1, а), линии которой были строго параллельны сторонам полигона. Далее с целью увеличения плотности сканирования и анализа влияния направления



Рис. 1. Фотографии полевого эксперимента:
а — разметка сети прямоугольных профилей; б — процесс экскавации корней

съемки была задана с таким же шагом диагональная сеть профилей, линии которой расположены под углом 45° относительно первоначальной прямоугольной сети. Известно, что форма дифрагированной волны на радарограмме напрямую зависит от угла пересечения корня линией профиля (Tanikawa et al., 2013; Guo et al., 2015). При пересечении корня георадарным профилем под прямым углом поляризация электромагнитного поля параллельна линии простирания корня, в результате чего достигается максимальная энергия отражения георадарного сигнала и регистрация сигнала с высокими амплитудами. При углах, близких к 0° , область отражения от корня становится очень ограниченной, а на сигнал оказывает большее влияние фоновая почва (Guo et al., 2015). Поэтому использовалось предположение, что итоговая информативность определяется соотношением корневой архитектуры и сети наблюдений. Сбор данных выполнялся георадаром ОКО-2 (НПЦ «Геотех») с антенным блоком, имеющим центральную частоту 1700 МГц (базовая разрешающая способность ± 3 см). Предшествующие исследования показали эффективность высоких частот для идентификации небольших и близкорасположенных корней (Bain et al., 2017). Шаг трасс по профилю равнялся 2 см, а время трассы составляло 16 нс с 16 накоплениями. Всего для прямоугольной и диагональной сети было получено 30 и 58 профилей соответственно. Начало и конец профилей задавались деревянными пикетами.

Обработка осуществлялась в программном обеспечении GeoScan32, использовался стандартный набор фильтров: коррекция времени, вычитание среднего, полосовая фильтрация и регулировка усиления. Послойный скоростной анализ не выполнялся, для слоя почвы использовалось среднее значение скорости $V = 11.3$ см/нс, полученное по параметрическим замерам комплексной относительной диэлектрической проницаемости рефлектометром TDR200 (Campbell Scientific). В итоге был получен набор георадарных разрезов на глубину до 0.8 м, по которому выполнялся поиск и пикирование вершин дифрагированной волны, соответствующих отдельным корням. Для дальнейшего сравнения и детального анализа георадарных данных с фактическими параметрами корней была произведена экскавация корневой системы (рис. 1, б), и проведен ручной замер длин и диаметров всех корней с размером в диаметре 0.5 см и более. Также цифровым угломером оценивались направления расположения корней относительно осей X, Y, Z.

3. Результаты исследований

Для оценки георадарных данных в качестве первого этапа на основе прямых наблюдений анализировалась корневая архитектура дерева (рис. 2). При раскопке корней исследуемой ели было обнаружено, что основная их часть в почвенном горизонте располагалась на глубине 5–25 см, что указывает на преимущественно приповерхностное распределение. Морфометрическая структура корневой системы включала четыре основных крупных корня с диаметрами 14–22 см, исходящих от ствола дерева и направленных перпендикулярно друг к другу, к которым примыкали корни условного 2-го и 3-го порядков. В диагональном направлении также можно выделить участки повышенного роста корней разных порядков. В целом полученная картина соответствует представлениям о корневой архитектуре ели европейской. Всего по итогам раскопки были выполнены описания 251 корня

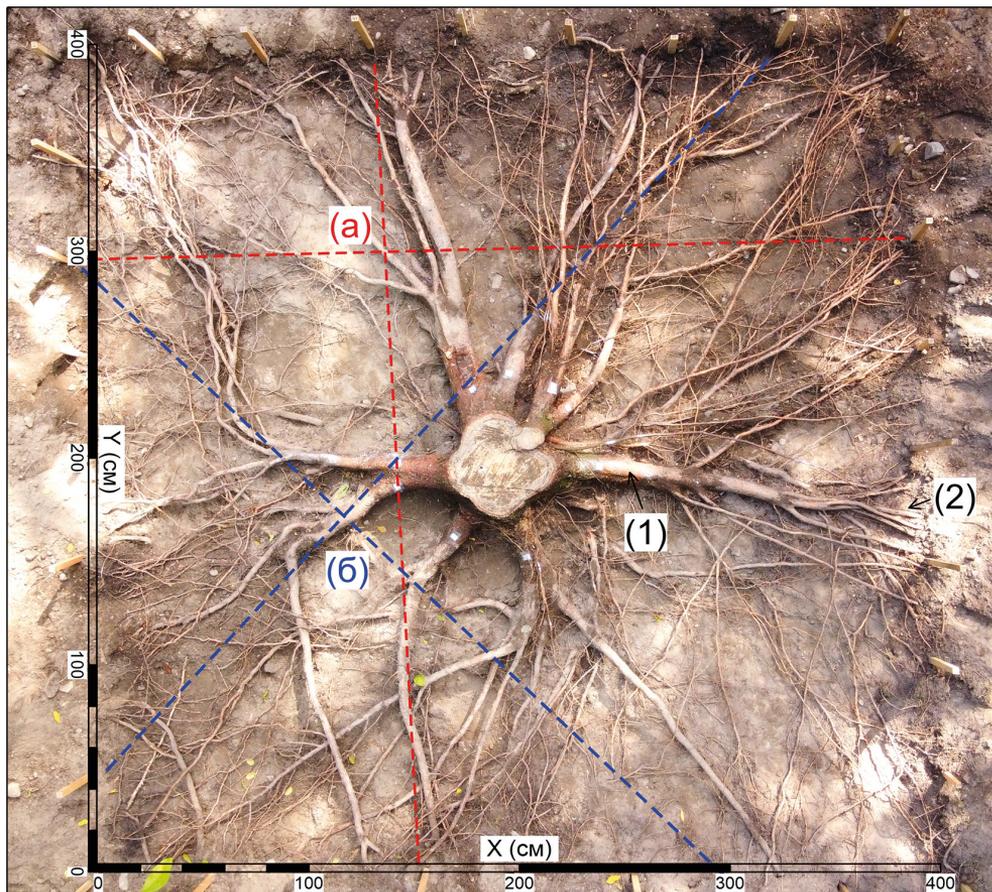


Рис. 2. Фотоплан корневой системы ели европейской, где (1) корни первого порядка, а (2) корни второго порядка. На план нанесен пример профилей (а) прямоугольной и (б) диагональной сети

с диаметром от 0.5 см и более. Результаты ручных замеров показали, что общая протяженность корневой системы составила 18 408 см, а средняя длина одного корня — 74.5 см. Диаметры корней варьировались от 0.5 до 24 см, но преобладали 1–3 см. Углы наклона отдельных корней в вертикальной плоскости изменялись от 0 до 89°, однако большая часть из них (80 %) имела наклон менее 30°. Дополнительно перед сносом дерева влагомером для древесины Hydromette HT85T (GANN) были проведены измерения влажности верхней части древесины ствола и крупных корней, в которой осуществляется основной транспорт воды от корней к кроне, — заболони. Указанная часть древесины обладает наибольшей влажностью, так как несет функцию транспорта воды к кроне. Обнаружено, что корни отличаются по влажности от заболони ствола в полтора раза — 76 против 49 %. Такая высокая влажность связана с процессами питания дерева и однозначно имеет влияние на электрофизические параметры. В итоге все перечисленные показатели свидетельствуют о том, что значимая часть корней обследованной ели европейской имеет отклик на радарограммах.

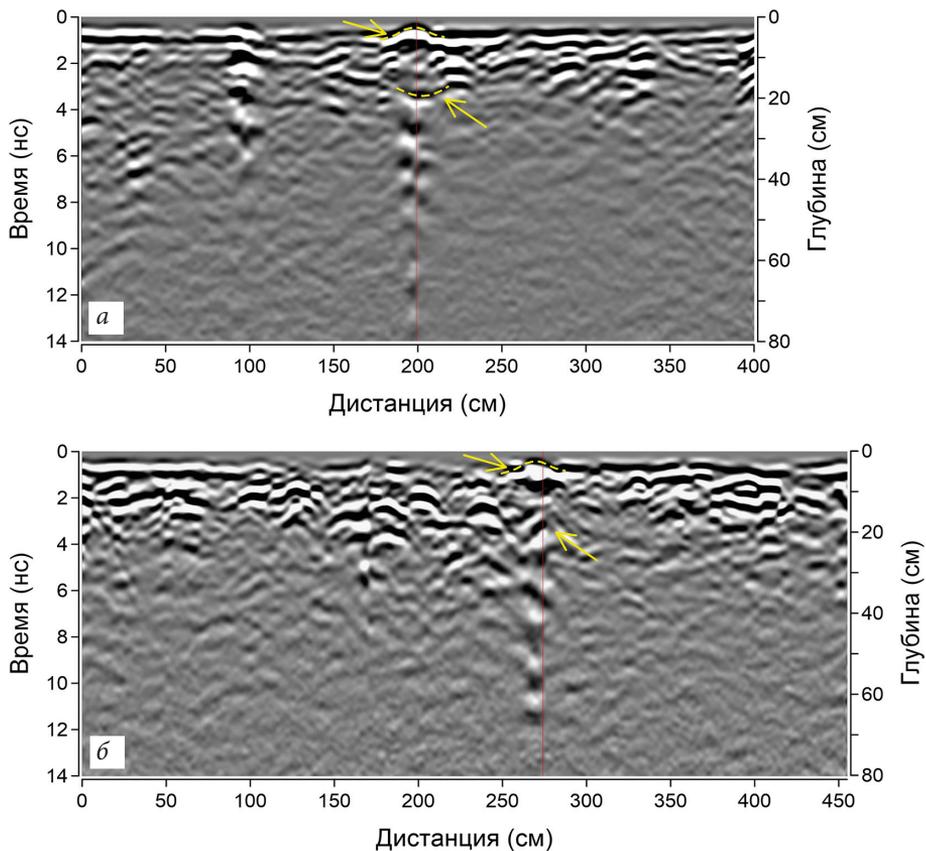


Рис. 3. Радарограммы, полученные по прямоугольной (а) и по диагональной (б) сети георадарных наблюдений, желтыми стрелками указана точка пересечения профилем крупного корня

На рис. 3 показан пример радарограмм по прямоугольной и диагональной сети, которые пересекают приповерхностный крупный корень диаметром 17 см. На обеих записях уверенно фиксируется набор дифрагированных волн в интервале глубин 5–22 см. Что же касается крупного корня: в случае прямоугольной сети профиль пересекал его под прямым углом, тогда как линия диагонального профиля проходила под углом около 45° . Вследствие чего в первом случае корень выражен на радарограмме не в виде четкой дифрагированной волны, а как два отдельных полукруглых рефлектора, образовавшихся на его верхней и нижней кромках. Во втором случае картина не столь ясная, читается отражение от верхней кромки, а ниже интерпретация затруднена. Тем не менее в обоих рассматриваемых случаях крупный корень образует однозначный георадарный образ с определенными признаками. Кроме очевидного увеличения амплитуды, вызванной повышением контраста с вмещающими почвами из-за присутствия сока в сосудах древесины и внутреннем проводящем слое коры корня (лубе, или флоэме), следует подчеркнуть изменение сигнала, выраженного в формировании заднего фронта трассы на временах до 12 нс. Вероятно, это связано с кратными отражениями внутри тела корня. В свою очередь, для крупных корней, залегающих на глубине более 10 см,

подобный эффект не наблюдается, на границах формируются обычные дифрагированные волны. По всей видимости, увеличение первой зоны Френеля с глубиной приводит к значительному осреднению, и фактор сока в теле корня меньше влияет на частотную составляющую отраженного сигнала.

Как уже отмечалось, большая часть корней обследуемого дерева имеет диаметр, соотносимый с вертикальной разрешающей способностью высокочастотного антенного блока, и отвечает условиям дифракции. Исходя из общепринятых формул для оценки разрешающей способности георадиолокации (Владов и Судакова, 2017) получается: длина волны в обследованном грунте составляет порядка 7.5 см (с учетом смещения центральной частоты в грунте до 1500 МГц), поэтому явление дифракции возникает на корнях размером 1.8–7.5 см; разрешающая способность сигнала по глубине $\Delta r \geq 1.8$ см; эффективная область отражения $r_{эф}$ меняется от 2.7 см в приповерхностной части до 9.7 см на глубине 25 см.

Из-за своих размеров корни отражаются на георадарной записи преимущественно как локальные объекты, образуя единичную дифрагированную волну либо (при большем диаметре) пару таких волн от верхней и нижней кромки корня. В случае слишком большого диаметра и нарушения условия локального объекта корни отображаются на радарограмме в виде отдельных коротких осей синфазности. Таким образом, объектом поиска были не только единичные дифрагированные волны, но и пары таких волн, а также отдельные короткие оси синфазности. На практике по вершинам дифрагированных волн получилось выявить корни с диаметром в диапазоне 2–9.5 см, что в целом согласуется с теоретической оценкой. Эффект перекрытия и интерференции наблюдается для отраженного сигнала с близкорасположенных небольших корней, особенно в местах их ветвления. В ряде случаев это приводит к возникновению в волновом поле отдельного сегмента оси синфазности с высокой амплитудой сигнала.

В итоге возникла достаточно трудоемкая задача по пикированию их вершин. На каждой радарограмме присутствует несколько десятков целевых объектов, соотносимых с отдельными корнями. Некоторые корни, особенно крупные, обладают характерными георадарными паттернами, которые можно достаточно просто идентифицировать и трассировать на серии параллельных профилей (рис. 4), несмотря на имеющиеся технические решения по автоматической пикировке, различные искажения, связанные с помехами съёмки, плотностью расположения корней в почве или несимметричной формой дифрагированных волн. Так, например, штатным модулем обнаружения в программе GeoScan32 выявлено 15 единиц при пороге нечувствительности 10 %, тогда как по факту их в полтора раза больше (рис. 5).

В результате выполнения пикировки для каждой сети профилей было составлено облако точек, где X , Y , Z — координаты расположения каждой вершины дифрагированной волны. Облака точек были сопоставлены с фотопланом корневой системы для сравнения позиций выявленных вершин с реальным положением корней (рис. 6). Следует отметить, что визуальное распределение данных диагональной сети имеет облик, лучше повторяющий контуры корневой системы. Это связано как с большей плотностью наблюдений — в случае диагональной сети было найдено 477 гипербол в сравнении с 341 в случае прямоугольной сети, — так и с меньшим количеством случаев пересечений линии корня профилем георадиолокации под критическим углом, который составляет менее 45 или более 135° (Tanikawa et al.,

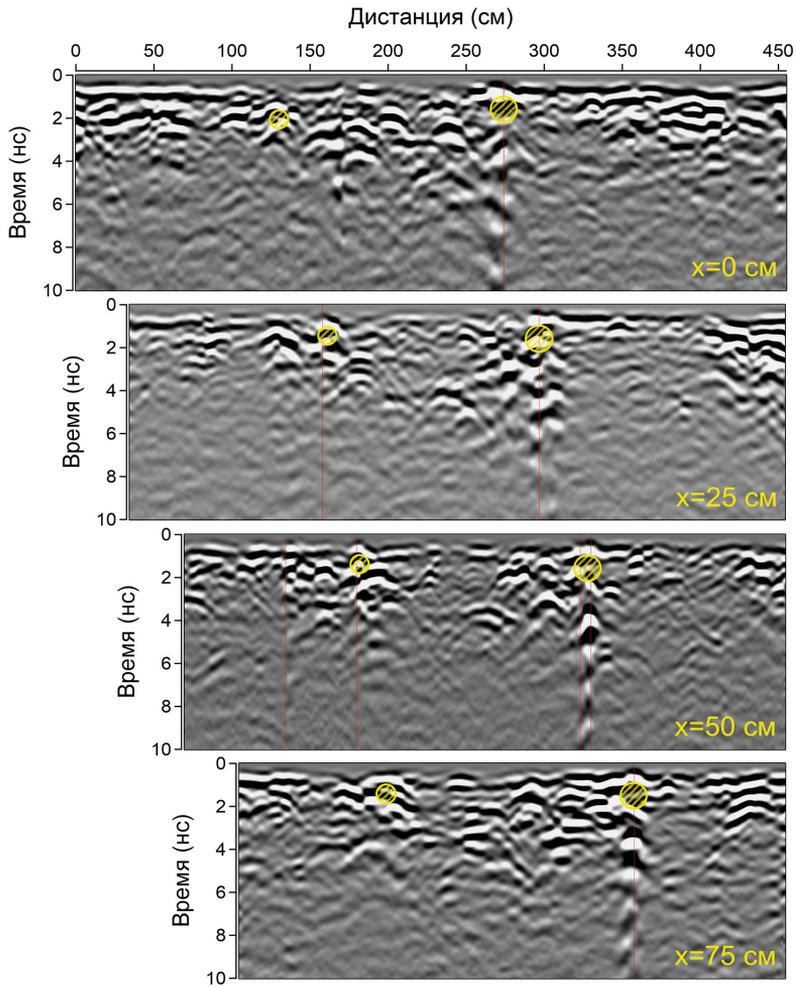


Рис. 4. Пример трассирования двух крупных корней по серии георадарных профилей

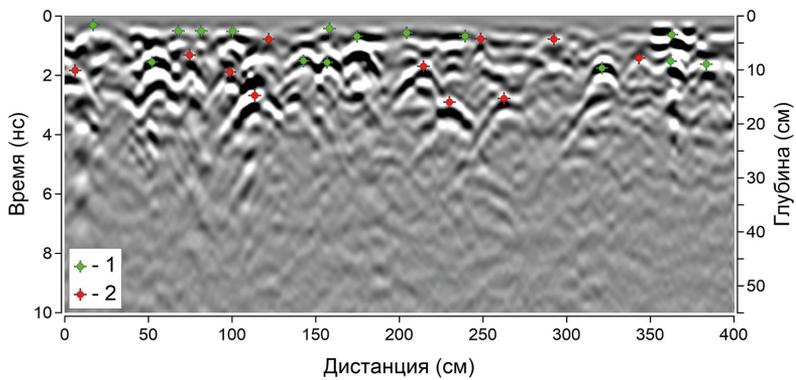


Рис. 5. Поиск дифрагированных волн от корней на радарограмме:

1 — вершины, пикированные в автоматическом режиме; 2 — вершины, добавленные в ручном режиме

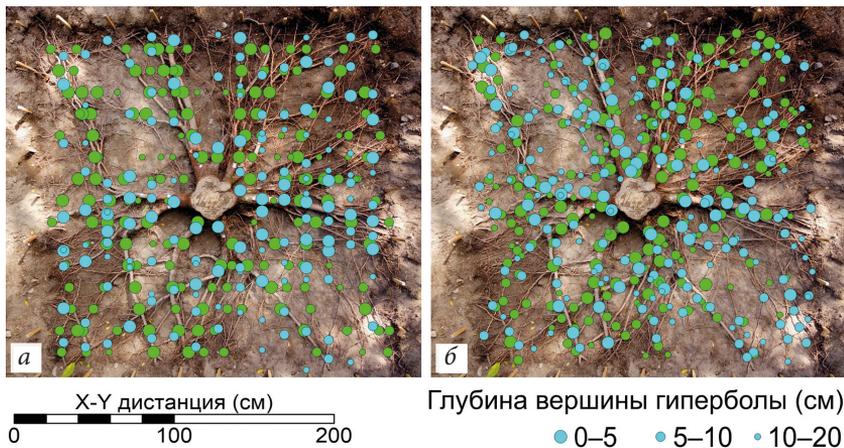


Рис. 6. Облако точек, демонстрирующее положения вершин дифрагированных волн, полученных по параллельной (а) и диагональной (б) сети профилей, относительно фотоплана корневой системы ели европейской

2013; Guo et al., 2015). При таких углах пересечения дифрагированная волна сильно искажается или трансформируется в линейный рефлектор, что препятствует пикированию их вершины. В целом, по георадарным данным даже на качественном уровне интерпретации уверенно разделяются области с разным количеством корней в почве, что может указывать на особенности развития корневой системы ели европейской.

Распределение дифрагирующих объектов по глубине также соответствует наблюдаемому фактическому расположению корней. По данным георадиолокации, основное их количество сосредоточено на глубинах, не превышающих 25 см, с максимумом в интервале 2–10 см (рис. 7). При этом выделяется различие между

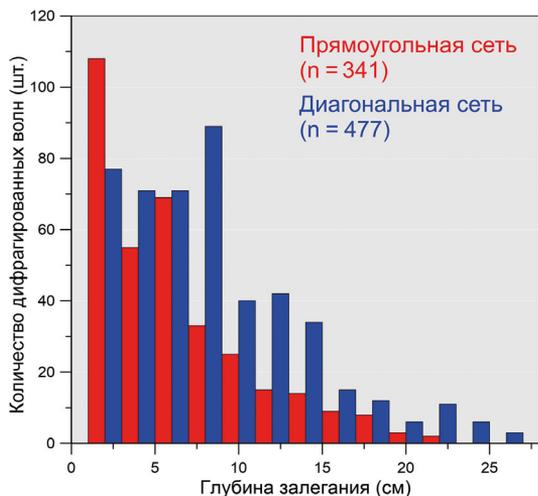


Рис. 7. Гистограмма распределения выявленных дифрагирующих объектов по глубине

наблюдениями по разным сетям, диагональная съемка обеспечила выявление корней на глубинах 15–25 см. Возможно, это является просто следствием более широкой итоговой выборки. Полученный результат подчеркивает особенность условий произрастания деревьев в районе работ, а именно расположенных близко к дневной поверхности скальных грунтов, которые выступают как корненипроницаемый горизонт и способствуют включению механизмов адаптации в виде развития приповерхностных корней.

К наиболее сложной части интерпретации радарограмм относится атрибутивный анализ. При изучении

корней доказано существование взаимосвязи между временами прохождения сигнала, максимальной амплитудой, энергией с их диаметром и биомассой (Hirano et al., 2009; Tanikawa et al., 2013; Yamase et al., 2018). Однако там же указывается, что амплитуда является не стационарным параметром, который может кардинально меняться даже в короткие промежутки времени, например из-за осадков или эвапотранспирации. Поэтому в качестве предиктора диаметра корня целесообразно использование суммарной длительности (ΣT) отраженного импульса в наносекундах. В исследовании (Cui et al., 2011) подчеркивается эффективность данного атрибута для оценки диаметра корней. Такой подход проиллюстрирован на рис. 8, где показано, как меняется волновое поле и форма трассы в зависимости от размеров корня. При диаметре корня 8 см волновой пучок имеет длительность 1.11 нс и состоит из трех пиков. При его увеличении до 9 см протяженность волнового пакета возрастает до 1.87 нс, возрастает максимальная амплитуда, отчетливо выделяется дополнительное отражение от нижней границы, также имеющее три отдельных пика. Еще большее увеличение диаметра до 13 см значительно трансформирует сигнал, длительность достигает 2.36 нс, проявляется высокоамплитудное отражение и от нижней границы, а также возникает эффект заднего фронта, который обсуждался ранее. Вызывает интерес небольшое изменение периода импульса при увеличении диаметра корня. Прослеживается его укорачивание примерно на 0.2 нс, что, по-видимому, связано с уменьшением длины волны, вызванным влагой в корне.

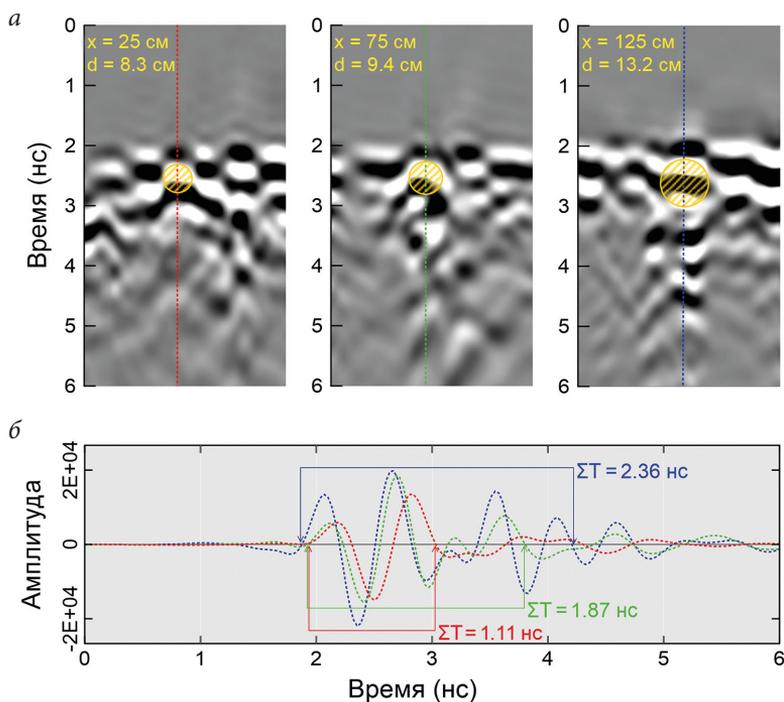


Рис. 8. Анализ георадарных атрибутов вдоль корня с известным диаметром: а — фрагменты радарограмм с нанесенным сечением корня; б — одиночные трассы для центра каждого фрагмента

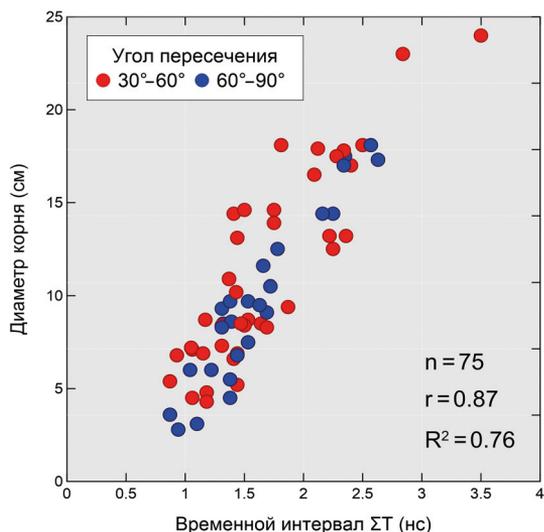


Рис. 9. Диаграмма рассеяния для сопоставления параметров длительности импульса и диаметра корня ели европейской

степень их связи $r = 0.82$. Общая зависимость имеет линейный характер с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.76$, хотя присутствует и заметная дисперсия. Дифрагированные волны, полученные в условиях угла пересечения меньше 60° , демонстрируют большую ошибку. При раздельном расчете для таких измерений $r = 0.84$, а $R^2 = 0.7$, тогда как для углов в диапазоне $90-60^\circ$ $r = 0.95$, $R^2 = 0.9$. Таким образом, подтверждается факт возможности определения диаметра корня по временам волнового цуга. Однако для конечных оценок следует принимать во внимание и иные источники погрешности, например неровность поверхности съемки или приповерхностные скоростные неоднородности среды.

4. Обсуждение результатов

На сегодняшний день существует задача верификации имеющихся параметров корневых систем, сделанных по результатам георадарных наблюдений. Несмотря на имеющиеся работы, предлагающие подходы к оценке биомассы корней по данным георадиолокации (Borden et al., 2014; Butnor et al., 2016), сохраняется проблема полноты детектирования корневой архитектуры, особенно в слабоконтрастных условиях. Например, в работе (Bain et al., 2017) подчеркивается сложность идентификации мертвых корней. Поэтому логично предположить, что необходимо проводить систематическую работу по параметризации корней разных видов деревьев по набору обоснованных георадарных атрибутов. Новые программные средства по комплексному анализу динамических параметров георадарного сигнала могут способствовать развитию данного направления. Следует отметить, что дерево является живым организмом, свойства которого изменяются в зависимости от времени суток, сезона, количества осадков, инсоляции, фенологической фазы и т. п.,

Представленные наблюдения подтверждают существование численной зависимости, дополнительно обосновать которую можно статистически. Для этого из всех серий радарограмм были выбраны участки с наиболее представительными дифрагированными волнами и размерами корней, известными по прямым наблюдениям, всего 75 единиц (9 % от общей выборки). С каждой георадарной трассы в точке дифракции снимался параметр ΣT , который сопоставлялся с известным диаметром корня. Кроме того, принимался во внимание угол пересечения профилем корней. Результирующая диаграмма рассеяния демонстрируются на рис. 9. Расчет коэффициента корреляции для полученного набора данных показал высокую

что предполагает общую нестационарность геофизических полей и важность мониторингового подхода.

Полученная в ходе исследований сильная корреляция для выборки «диаметр — ΣT » выделяется в сравнении с примерами георадарного изучения корней других деревьев (таблица). Так, например, имеющиеся данные для криптомерии японской и сосны Тунберга демонстрируют слабую степень корреляции при схожем диапазоне диаметров детектируемых корней. Вероятно, полученный результат для ели европейской является следствием совокупного ряда эффектов. Во-первых, измерения выполнялись на живой и функционирующей корневой системе, из-за чего сохранялись процессы течения сока в древесине. Как уже отмечалось, зачастую эксперименты проводятся на фрагментах корней, выкопанных заранее, что приводит к их неестественным электрофизическим параметрам. Во-вторых, полная экскавация корневой системы обеспечила большой набор данных, и это позволило выбрать наиболее представительные случаи для выборки сопоставления. По сути, результат был улучшен за счет возможности ручного отбора статистически значимых замеров. Для сравнения: в большинстве случаев выборка включает 30–40 замеров (таблица), без возможности подобрать оптимальные измерения. В-третьих, выбранный объект исследований благоприятствовал выполнению подобных исследований. Ель европейская обладает преимущественно субгоризонтальной корневой системой и имеет хорошо развитые скелетные корни. Как было ранее отмечено, корреляция диаметра корня и георадарных параметров снижается, начиная с глубин 10–15 см (Butnor et al., 2001; Hirano et al., 2012). На исследуемом полигоне подавляющее число корней изученной ели располагалось на глубинах, не превышающих 25 см (рис. 7), что делает их георадарные описания более точным в сравнении с аналогичными натурными наблюдениями, где нижняя граница залегания была 30 см и глубже (таблица). Следует отметить, что и ориентация полигона в значительной мере предопределила меньшую эффективность прямоугольной сети, так

Таблица. Результаты сопоставления диаметра корней и показателя суммарного временного интервала ΣT (нс)

Вид дерева (тип эксперимента)	Антенный блок (МГц)	Диаметр корней (см)		Глубина залегания корней (см)		r, R^{2*}	n^{**}	Источник
		min	max	min	max			
Криптомерия японская (лабораторный)	900	1.0	7.8	0	50	0.30 –	30	(Hirano et al., 2009)
Вяз приземистый (модельный)	2000	0.5	3.5	10	80	–0.88	30	(Cui et al., 2011)
Сосна Тунберга (натурный)	1500	0.2	>5	0	30	0.17 –	103	(Hirano et al., 2012)
Криптомерия японская (натурный)	900	0.5	30	0	90	–0.48	41	(Yamase et al., 2018)
Ель европейская (натурный)	1700	0.5	24	0	25	0.87 0.76	75	Данная работа

Примечание. Если коэффициент не оценивался, в таблице это обозначено прочерком.

*Коэффициенты корреляции и детерминации.

**Размер выборки.

как стороны прямоугольника были расположены практически параллельно целому ряду крупных корней, что в целом понизило эффективность съемки. Поэтому возникает вопрос о выявлении наиболее универсальной сети. Возможно, при решении технической задачи по выдержке постоянного радиуса съемки такой сетью может быть радиальная, так как отсутствие постоянного угла линий профиля сокращает случаи критического угла пересечения.

Отдельно следует отметить вопрос влияния рабочей частоты георадара. Высокая разрешающая способность помогает выделить корни с небольшим диаметром, тогда как крупные корни перестают отвечать требованиям локального объекта, на котором формируется дифрагированная волна. В результате такие корни переходят в другой объект поиска в виде небольших полукруглых рефлекторов. Важность соотношения диаметра и длины волны подчеркивается в работе (Cui et al., 2011), где при обследовании вяза приземистого с малоразмерными корнями антенна с частотой 2000 МГц обеспечила результаты с высоким R^2 (таблица). В случае рассматриваемой ели европейской средний диаметр корня также попадал в оптимальный диапазон антенного блока, что выражено в значении R^2 . Однако на данный момент неясно, какие точно частотные трансформации могут происходить при прохождении сигнала через древесину корня, особенно крупного диаметра. По полученным георадарным записям можно предположить перспективность анализа частотного спектра для области залегания корней, так как такой спектр должен иметь отличия в сравнении с вмещающими почвами.

5. Заключение

Проведенные исследования еще раз продемонстрировали эффективность георадиолокации для решения междисциплинарных задач в области почвоведения и лесоведения. В рассматриваемом случае для ели европейской георадарные данные позволили восстановить корневую архитектуру в естественном залегании и определить признаки наиболее крупных скелетных корней. Для эффективного решения задач по поиску корней деревьев с неизвестной ориентацией решающим является плотность георадарных данных и комбинирование сетей наблюдений, так как статистически повышается вероятность пересечь корни под оптимальным углом. Несмотря на имеющиеся проблемы, связанные с параметризацией корней по электрофизическим свойствам, обоснованию их паттернов в волновом поле, а также необходимостью новых алгоритмов обработки больших массивов георадарных данных, полученные результаты свидетельствуют о возможности получения принципиально новой информации о строении и функционировании корневых систем деревьев. В перспективе стоят задачи по развитию способов полуколичественного определения биомассы корней в рамках проектов по оценке запасов углерода.

Литература

- Владов, М. Л. и Судакова, М. С. (2017). *Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений: учеб. пособие*. М.: ГЕОС.
- Демидов, И. Н. и Лукашов, А. Д. (2001). Рельеф и четвертичные отложения ботанического сада петрозаводского государственного университета как основа его современных ландшафтов. *Hortus Botanicus*, 1, 25–33.

- Калинин, М. И. (1991). *Корневедение*. М.: Экология.
- Колесников, В. А. (1972). *Методы изучения корневой системы древесных растений*. 2-е изд. М.: Лесная промышленность.
- Рязанцев, П. А., Кабонен, А. В., Родионов, А. И. (2020). Определение архитектоники корневой системы деревьев методом георадиолокации. *Вестник Томского государственного университета. Биология*, 51, 179–204. <https://doi.org/10.17223/19988591/51/10>
- Alani, A. M. and Lantini, L. (2020). Recent Advances in Tree Root Mapping and Assessment Using Non-destructive Testing Methods: A Focus on Ground Penetrating Radar. *Surveys in Geophysics*. 2020, 41, 605–646. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09548-6>
- Allred, B. J., Daniels, J. J., Ehsani, M. R., eds (2008). *Handbook of Agricultural Geophysics*. Boca Raton: CRC Press.
- Altdorff, D., Botschek, J., Honds, M., van der Kruk, J. (2019). In situ detection of tree root systems under heterogeneous anthropogenic soil conditions using ground penetrating radar. *Journal of Infrastructure Systems*, 25 (3), 1–8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000501](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000501)
- Amato, M., Basso, B., Cellano, G., Bitella, G., Morelli, G., Rossi, R. (2008). In situ detection of tree root distribution and biomass by multielectrode resistivity imaging. *Tree Physiology*, 28, 1441–1448. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.10.1441>
- Atkinson, J. A., Pound, M. P., Bennett, M. J., Wells, D. M. (2019). Uncovering the hidden half of plants using new advances in root phenotyping. *Current Opinion in Biotechnology*, 55, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2018.06.002>
- Bain, J. C., Day, F. P., Butnor, J. R. (2017). Experimental Evaluation of Several Key Factors Affecting Root Biomass Estimation by 1500 MHz Ground-Penetrating Radar. *Remote Sensing*, 9, 1337. <https://doi.org/10.3390/rs9121337>
- Barton, C. V. M. and Montagu, K. D. (2004). Detection of tree roots and determination of root diameters by ground penetrating radar under optimal conditions. *Tree Physiology*, 24 (12), 1323–1331. <https://doi.org/10.1093/treephys/24.12.1323>
- Borden, K. A., Isaac, M. E., Thevathasan, N. V., Gordon, A. M., Thomas, S. C. (2014). Estimating coarse root biomass with ground penetrating radar in a tree-based intercropping system. *Agroforest System*, 88, 657–669. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9722-5>
- Borden, K. A., Thomas, S. C., Isaac, M. E. (2017). Interspecific variation of tree root architecture in a temperate agroforestry system characterized using ground-penetrating radar. *Plant and Soil*, 410, 323–334. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3015-x>
- Butnor, J. R., Doolittle, J. A., Kress, L., Cohen, S., Johnsen, K. H. (2001). Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree Physiology*, 21 (17), 1269–1278. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.17.1269>
- Butnor, J. R., Samuelson, L. J., Stokes, T. A., Johnsen, K. H., Anderson, P. H., González-Benecke, C. A. (2016). Surface-based GPR underestimates below-stump root biomass. *Plant and Soil*, 402, 47–62. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2768-y>
- Cui, X., Chen, J., Shen, J. S., Cao, X., Chen, X. H., Zhu, X. L. (2011). Modeling tree root diameter and biomass by ground penetrating radar. *Science China Earth Sciences*, 54, 711–719. <https://doi.org/10.1007/s11430-010-4103-z>
- Danjon, F., Caplan, J. S., Fortin, M., Meredieu, C. (2013). Descendant root volume varies as a function of root type: estimation of root biomass lost during uprooting in *Pinus pinaster*. *Frontiers in Plant Science*, 4, 402. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00402>
- Delgado, A., Novo, A., Hays, D. B. (2019). Data Acquisition Methodologies Utilizing Ground Penetrating Radar for Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) Root Architecture. *Geosciences*, 9 (4), 171. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040171>
- Ehsoioko, S., Nguyen, F., Rao, S., Kremer, T., Placencia-Gomez, E., Huisman, J. A., Kemna, A., Javaux, M., Garré, S. (2020). Sensing the electrical properties of roots: A review. *Vadose Zone Journal*, 19, e20082. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20082>
- Eshel, A. and Beekman, T., eds (2013). *Plant roots: the hidden half*. Boca Raton: CRC Press.
- Fourcaud, T., Ji, J., Zhang, Z., Stokes, A. (2008). Understanding the impact of root morphology on uprooting mechanisms: a modelling approach. *Annals of Botany*, 101, 1267–1280. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm245>

- Ghani, M. A., Stokes, A., Fourcaud, T. (2009). The effect of root architecture and root loss through trenching on the anchorage of tropical urban trees (*Eugenia grandis* Wight). *Trees*, 23, 197–209. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0269-9>
- Gregory, P.J. (2006). *Plant roots; growth, activity and interaction with soils*. Oxford: Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9780470995563>
- Guo, L., Chen, J., Cui, X. H., Fan, B. H., Lin, H. (2013). Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: A review. *Plant and Soil*, 362, 1–23. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1455-5>
- Guo, L., Mount, G. J., Hudson, S., Lin, H., Levi, D. (2020). Pairing geophysical techniques improves understanding of the near-surface Critical Zone: Visualization of preferential routing of stem flow along coarse roots. *Geoderma*, 357, 113953. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113953>
- Guo, L., Wu, Y., Chen, J., Hirano, Y., Tanikawa, T., Li, W., Cui, X. (2015). Calibrating the impact of root orientation on root quantification using ground-penetrating radar. *Plant and Soil*, 395, 289–305. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2563-9>
- Hirano, Y., Dannoura, M., Aono, K., Igarashi, T., Ishii, M., Yamase, K., Makita, N., Kanazawa, Y. (2009). Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar. *Plant and Soil*, 319, 15–24. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9845-4>
- Hirano, Y., Yamamoto, R., Dannoura, M., Aono, K., Igarashi, T., Ishii, M., Yamase, K., Makita, N., Kanazawa, Y. (2012). Detection frequency of *Pinus thunbergii* roots by ground-penetrating radar is related to root biomass. *Plant and Soil*, 360, 363–373. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1252-1>
- Hruška, J., Čermák, J., Sustek, S. (1999). Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Tree Physiology*, 19 (2), 125–130. <https://doi.org/10.1093/treephys/19.2.125>
- Köstler, J. N., Bruckner, E., Bibelriether, H. (1968). *The root systems of forest trees*. Hamburg: Paul Parey.
- Liu, X., Cui, X., Guo, L., Chen, J., Li, W., Yang, D., Cao, X., Chen, X., Liu, Q., Lin, H. (2019). Non-invasive estimation of root zone soil moisture from coarse root reflections in ground-penetrating radar images. *Plant and Soil*, 436, 623–639. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-03919-5>
- Liu, X., Dong, X., Xue, Q., Leskovar, D. I., Jifon, J., Butnor, J. R., Marek, T. (2018). Ground penetrating radar (GPR) detects fine roots of agricultural crops in the field. *Plant and Soil*, 423, 517–531. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3531-3>
- Lundström, T., Jonas, T., Stöckli, V., Ammann, W. (2007). Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, root–soil plate geometry and root growth orientation. *Tree Physiology*, 27 (9), 1217–1227. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.9.1217>
- Mancuso, S., ed. (2012). *Measuring Roots. An Updated Approach*. Berlin: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22067-8>
- Martin, T. (2012). Complex resistivity measurements on oak. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70, 45–53. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0493-z>
- Martínez-Sala, R., Rodríguez-Abad, I., Barra, R. D., Capuz-Lladro, R. (2013). Assessment of the dielectric anisotropy in timber using the nondestructive GPR technique. *Construction and Building Materials*, 38, 903–911. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.052>
- Mary, B., Saracco, G., Peyras, L., Vennetier, M., Mériaux, P., Camerlynck, C. (2016). Mapping tree root system in dikes using induced polarization: Focus on the influence of soil water content. *Journal of Applied Geophysics*, 135, 387–396. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.05.005>
- Mickovski, S. and Ennos, A. (2003). Model and whole-plant studies on the anchorage capabilities of bulbs. *Plant and Soil*, 255, 641–652. <https://doi.org/10.1023/A:1026007229517>
- Montagnoli, A., Lasserre, B., Sferra, G., Chiatante, D., Scippa, G.S., Terzaghi, M., Dumroese, R. K. (2020). Formation of annual ring eccentricity in coarse roots within the root cage of *Pinus ponderosa* growing on slopes. *Plants*, 9, 181. <https://doi.org/10.3390/plants9020181>
- Postic, F., Doussan, C. (2016). Benchmarking electrical methods for rapid estimation of root biomass. *Plant Methods*, 12 (1), 33. <https://doi.org/10.1186/s13007-016-0133-7>
- Puhe, J. (2003). Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in forest stands — a review. *Forest Ecology and Management*, 175 (1–3), 253–273. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00134-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00134-2)
- Repo, T., Korhonen, A., Laukkanen, M., Lehto, T., Silvennoinen, R. (2014). Detecting mycorrhizal colonisation in Scots pine roots using electrical impedance spectra. *Biosystems Engineering*, 121, 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.02.014>

- Rodríguez-Robles, U., Arredondo, T., Huber-Sannwald, E., Ramos-Leal, J. A., Yopez, E. A. (2017). Technical note: Application of geophysical tools for tree root studies in forest ecosystems in complex soils. *Biogeosciences*, 14 (23), 5343–5357. <https://doi.org/10.5194/bg-14-5343-2017>
- Sani, L., Lisci, R., Moschi, M., Sarri, D., Rimediotti, M., Vieri, M., Tofanelli, S. (2012). Preliminary experiments and verification of controlled pulling tests for tree stability assessments in Mediterranean urban areas. *Biosystems Engineering*, 112 (3), 218–226. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.04.004>
- Shanahan, P. W., Binley, A., Whalley, W. R., Watts, C. R. (2015). The use of electromagnetic induction to monitor changes in soil moisture profiles beneath different wheat genotypes. *Soil Science Society of America Journal*, 79 (2), 459–466. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.09.0360>
- Stover, D. B., Day, F. P., Butnor, J. R., Drake, B. G. (2007). Effect of elevated CO₂ on coarse-root biomass in Florida scrub detected by ground-penetrating radar. *Ecology*, 88 (5), 1328–1334. <https://doi.org/10.1890/06-0989>
- Tanikawa, T., Hirano, Y., Dannoura, M., Yamase, K., Aono, K., Ishii, M., Igarashi, T., Ikeno, H., Kanazawa, Y. (2013). Root orientation can affect detection accuracy of ground-penetrating radar. *Plant and Soil*, 373, 317–327. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1798-6>
- Torgovnikov, G. I. (1993). *Dielectric properties of wood and wood-based materials*. Berlin: Springer.
- Vennetier, M., Zanetti, C., Mériaux, P., Mary, B. (2015). Tree root architecture: New insights from a comprehensive study on dikes. *Plant and Soil*, 387, 81–101. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2272-9>
- Whalley, W., Binley, A., Watts, C., Shanahan, P., Dodd, I. C., Ober, E. S., Ashton, R. W., Webster, C. P., White, R. P., Hawkesford, M. J. (2017). Methods to estimate changes in soil water for phenotyping root activity in the field. *Plant and Soil*, 415, 407–422. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3161-1>
- Yamase, K., Tanikawa, T., Dannoura, M., Ohashi, M., Todo, C., Ikeno, H., Aono, K., Hirano, Y. (2018). Ground-penetrating radar estimates of tree root diameter and distribution under field conditions. *Trees*, 32, 1657–1668. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1741-9>
- Yeung, S. W., Yan, W. M., Hau, C. H. B. (2016). Performance of ground penetrating radar in root detection and its application in root diameter estimation under controlled conditions. *Science China Earth Sciences*, 59, 145–155. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5156-9>
- Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., Royet, P., Provansal, M. (2011a). Managing woody vegetation on earth dikes: Risks assessment and maintenance solutions. *Procedia Environmental Sciences*, 9, 196–200. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.11.030>
- Zanetti, C., Weller, A., Vennetier, M., Mériaux, P. (2011b). Detection of buried tree root samples by using geoelectrical measurements: A laboratory experiment. *Plant and Soil*, 339, 273–283. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0574-0>
- Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., Provansal, M. (2015). Plasticity of tree root system structure in contrasting soil materials and environmental conditions. *Plant and Soil*, 387 (1–2), 21–35. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2253-z>

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2023 г.
Статья рекомендована к печати 15 февраля 2024 г.

Контактная информация:

Рязанцев Павел Александрович — chthonian@yandex.ru
Кабонен Алексей Валерьевич — alexkabonen@mail.ru

Criteria for mapping and estimation root systems using ground penetrating radar by the example of the European spruce*

P. A. Ryazantsev¹, A. V. Kabonen²

¹ Department of Multidisciplinary Scientific Research of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences,

11, ul. Pushkinskaya, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation

² Petrozavodsk State University,

33, pr. Lenina, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation

For citation: Ryazantsev, P. A., Kabonen, A. V. (2024). Criteria for mapping and estimation root systems using ground penetrating radar by the example of the European spruce. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 69 (2), 251–273. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.203> (In Russian)

This study discusses about approaches to using ground penetrating radar (GPR) techniques to characterize tree roots and to monitor their conditions in urban environments. For this purpose, our research was to map and determine the reliability of the root system of trees evaluating in their natural occurrence using the GPR method. As an object of research, a separate European spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) was selected, under which a testing area measuring 4 × 4 m was laid. To increase the detail, the field survey was performed with a GPR with a high-frequency antenna unit of 1,700 MHz. The influence of the observation networks on the GPR data on root architectonics was analyzed depending on their spatial orientation. Thus, surveying along a rectangular and diagonal network with a step of 25 cm showed different number diffraction hyperbolas. They were markers of separate roots. A pattern of distribution of diffraction hyperbolas in depth was discovered, corresponding to the growth characteristics of the tree under study. To verify the data, a complete excavation of spruce roots was conducted with a detailed manual description. In particular, it has been established that large roots have characteristic GPR patterns that can be traced on a series of parallel profiles. The reflected signal for the roots was analyzed and the relationship between their diameter and the length of the wave train was shown with a correlation coefficient of $r = 0.87$. Based on a survey of European spruce, GPR data made it possible to restore the root architecture in situ and determine criteria for searching for the largest coarse roots. Although there are problems associated with parameterization of roots, the results got show the possibility of obtaining new information about the structure and functioning of tree root systems.

Keywords: GPR attributes, diffracted wave, observation technique, root architectonics, root diameter.

References

- Alani, A. M. and Lantini, L. (2020). Recent Advances in Tree Root Mapping and Assessment Using Non-destructive Testing Methods: A Focus on Ground Penetrating Radar. *Surveys in Geophysics*. 2020, 41, 605–646. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09548-6>
- Allred, B. J., Daniels, J. J., Ehsani, M. R., eds (2008). *Handbook of Agricultural Geophysics*. Boca Raton: CRC Press.
- Altdorff, D., Botschek, J., Honds, M., van der Kruk, J. (2019). In situ detection of tree root systems under heterogeneous anthropogenic soil conditions using ground penetrating radar. *Journal of Infrastructure Systems*, 25 (3), 1–8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000501](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000501)

*The work was carried out within the framework of the state assignment of Department of Multidisciplinary Scientific Research of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences.

- Amato, M., Basso, B., Cellano, G., Bitella, G., Morelli, G., Rossi, R. (2008). In situ detection of tree root distribution and biomass by multielectrode resistivity imaging. *Tree Physiology*, 28, 1441–1448. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.10.1441>
- Atkinson, J. A., Pound, M. P., Bennett, M. J., Wells, D.M. (2019). Uncovering the hidden half of plants using new advances in root phenotyping. *Current Opinion in Biotechnology*, 55, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2018.06.002>
- Bain, J.C., Day, F.P., Butnor, J.R. (2017). Experimental Evaluation of Several Key Factors Affecting Root Biomass Estimation by 1500 MHz Ground-Penetrating Radar. *Remote Sensing*, 9, 1337. <https://doi.org/10.3390/rs9121337>
- Barton, C. V. M. and Montagu, K.D. (2004). Detection of tree roots and determination of root diameters by ground penetrating radar under optimal conditions. *Tree Physiology*, 24 (12), 1323–1331. <https://doi.org/10.1093/treephys/24.12.1323>
- Borden, K. A., Isaac, M. E., Thevathasan, N. V., Gordon, A. M., Thomas, S. C. (2014). Estimating coarse root biomass with ground penetrating radar in a tree-based intercropping system. *Agroforest System*, 88, 657–669. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9722-5>
- Borden, K. A., Thomas, S. C., Isaac, M.E. (2017). Interspecific variation of tree root architecture in a temperate agroforestry system characterized using ground-penetrating radar. *Plant and Soil*, 410, 323–334. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3015-x>
- Butnor, J.R., Doolittle, J.A., Kress, L., Cohen, S., Johnsen, K.H. (2001). Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree Physiology*, 21 (17), 1269–1278. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.17.1269>
- Butnor, J.R., Samuelson, L. J., Stokes, T. A., Johnsen, K. H., Anderson, P.H., González-Benecke, C. A. (2016). Surface-based GPR underestimates below-stump root biomass. *Plant and Soil*, 402, 47–62. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2768-y>
- Cui, X., Chen, J., Shen, J.S., Cao, X., Chen, X.H., Zhu, X.L. (2011). Modeling tree root diameter and biomass by ground penetrating radar. *Science China Earth Sciences*, 54, 711–719. <https://doi.org/10.1007/s11430-010-4103-z>
- Danjon, F., Caplan, J.S., Fortin, M., Meredieu, C. (2013). Descendant root volume varies as a function of root type: estimation of root biomass lost during uprooting in *Pinus pinaster*. *Frontiers in Plant Science*, 4, 402. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00402>
- Delgado, A., Novo, A., Hays, D.B. (2019). Data Acquisition Methodologies Utilizing Ground Penetrating Radar for Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) Root Architecture. *Geosciences*, 9 (4), 171. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040171>
- Demidov, I.N. and Lukashov, A.D. (2001). Relief and quaternary sediments of the Petrozavodsk State University Botanic Garden as the basis of its present landscapes. *Hortus Botanicus*, 1, 25–33. (In Russian)
- Ehosioke, S., Nguyen, F., Rao, S., Kremer, T., Placencia-Gomez, E., Huisman, J.A., Kemna, A., Javaux, M., Garré, S. (2020). Sensing the electrical properties of roots: A review. *Vadose Zone Journal*, 19, e20082. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20082>
- Eshel, A. and Beeckman, T., eds (2013). *Plant roots: the hidden half*. Boca Raton: CRC Press.
- Fourcaud, T., Ji, J., Zhang, Z., Stokes, A. (2008). Understanding the impact of root morphology on uprooting mechanisms: a modelling approach. *Annals of Botany*, 101, 1267–1280. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm245>
- Ghani, M. A., Stokes, A., Fourcaud, T. (2009). The effect of root architecture and root loss through trenching on the anchorage of tropical urban trees (*Eugenia grandis* Wight). *Trees*, 23, 197–209. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0269-9>
- Gregory, P.J. (2006). *Plant roots; growth, activity and interaction with soils*. Oxford: Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9780470995563>
- Guo, L., Chen, J., Cui, X.H., Fan, B.H., Lin, H. (2013). Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: A review. *Plant and Soil*, 362, 1–23. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1455-5>
- Guo, L., Mount, G.J., Hudson, S., Lin, H., Levi, D. (2020). Pairing geophysical techniques improves understanding of the near-surface Critical Zone: Visualization of preferential routing of stem flow along coarse roots. *Geoderma*, 357, 113953. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113953>

- Guo, L., Wu, Y., Chen, J., Hirano, Y., Tanikawa, T., Li, W., Cui, X. (2015). Calibrating the impact of root orientation on root quantification using ground-penetrating radar. *Plant and Soil*, 395, 289–305. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2563-9>
- Hirano, Y., Dannoura, M., Aono, K., Igarashi, T., Ishii, M., Yamase, K., Makita, N., Kanazawa, Y. (2009). Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar. *Plant and Soil*, 319, 15–24. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9845-4>
- Hirano, Y., Yamamoto, R., Dannoura, M., Aono, K., Igarashi, T., Ishii, M., Yamase, K., Makita, N., Kanazawa, Y. (2012). Detection frequency of *Pinus thunbergii* roots by ground-penetrating radar is related to root biomass. *Plant and Soil*, 360, 363–373. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1252-1>
- Hruška, J., Čermák, J., Sustek, S. (1999). Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Tree Physiology*, 19 (2), 125–130. <https://doi.org/10.1093/treephys/19.2.125>
- Kalinin, M. I. (1991). *Root study*. Moscow: Ekologiya Publ. (In Russian)
- Kolesnikov, V. A. (1972). *Methods for studying the root system of woody plants*. 2nd ed. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ. (In Russian)
- Köstler, J. N., Bruckner, E., Bibelriether, H. (1968). *The root systems of forest trees*. Hamburg: Paul Parey.
- Liu, X., Cui, X., Guo, L., Chen, J., Li, W., Yang, D., Cao, X., Chen, X., Liu, Q., Lin, H. (2019). Non-invasive estimation of root zone soil moisture from coarse root reflections in ground-penetrating radar images. *Plant and Soil*, 436, 623–639. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-03919-5>
- Liu, X., Dong, X., Xue, Q., Leskovar, D. I., Jifon, J., Butnor, J. R., Marek, T. (2018). Ground penetrating radar (GPR) detects fine roots of agricultural crops in the field. *Plant and Soil*, 423, 517–531. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3531-3>
- Lundström, T., Jonas, T., Stöckli, V., Ammann, W. (2007). Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, root–soil plate geometry and root growth orientation. *Tree Physiology*, 27 (9), 1217–1227. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.9.1217>
- Mancuso, S., ed. (2012). *Measuring Roots. An Updated Approach*. Berlin: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22067-8>
- Martin, T. (2012). Complex resistivity measurements on oak. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70, 45–53. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0493-z>
- Martínez-Sala, R., Rodríguez-Abad, I., Barra, R. D., Capuz-Lladro, R. (2013). Assessment of the dielectric anisotropy in timber using the nondestructive GPR technique. *Construction and Building Materials*, 38, 903–911. <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.052>
- Mary, B., Saracco, G., Peyras, L., Vennetier, M., Mériaux, P., Camerlynck, C. (2016). Mapping tree root system in dikes using induced polarization: Focus on the influence of soil water content. *Journal of Applied Geophysics*, 135, 387–396. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.05.005>
- Mickovski, S. and Ennos, A. (2003). Model and whole-plant studies on the anchorage capabilities of bulbs. *Plant and Soil*, 255, 641–652. <https://doi.org/10.1023/A:1026007229517>
- Montagnoli, A., Lasserre, B., Sferra, G., Chiatante, D., Scippa, G.S., Terzaghi, M., Dumroese, R. K. (2020). Formation of annual ring eccentricity in coarse roots within the root cage of *Pinus ponderosa* growing on slopes. *Plants*, 9, 181. <https://doi.org/10.3390/plants9020181>
- Postic, F., Doussan, C. (2016). Benchmarking electrical methods for rapid estimation of root biomass. *Plant Methods*, 12 (1), 33. <https://doi.org/10.1186/s13007-016-0133-7>
- Puhe, J. (2003). Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in forest stands — a review. *Forest Ecology and Management*, 175 (1–3), 253–273. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00134-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00134-2)
- Repo, T., Korhonen, A., Laukkanen, M., Lehto, T., Silvennoinen, R. (2014). Detecting mycorrhizal colonisation in Scots pine roots using electrical impedance spectra. *Biosystems Engineering*, 121, 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.02.014>
- Rodríguez-Robles, U., Arredondo, T., Huber-Sannwald, E., Ramos-Leal, J. A., Yepez, E. A. (2017). Technical note: Application of geophysical tools for tree root studies in forest ecosystems in complex soils. *Biogeosciences*, 14 (23), 5343–5357. <https://doi.org/10.5194/bg-14-5343-2017>
- Ryazantsev, P. A., Kabonen, A. V., Rodionov, A. I. (2020). Detection of the tree root system architecture using Ground penetrating radar. *Tomsk State University Journal of Biology*, 51, 179–204. <https://doi.org/10.17223/19988591/51/10> (In Russian)
- Sani, L., Lisci, R., Moschi, M., Sarri, D., Rimediotti, M., Vieri, M., Tofaneli, S. (2012). Preliminary experiments and verification of controlled pulling tests for tree stability assessments in Mediterranean urban areas. *Biosystems Engineering*, 112 (3), 218–226. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.04.004>

- Shanahan, P. W., Binley, A., Whalley, W. R., Watts, C. R. (2015). The use of electromagnetic induction to monitor changes in soil moisture profiles beneath different wheat genotypes. *Soil Science Society of America Journal*, 79 (2), 459–466. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.09.0360>
- Stover, D. B., Day, F. P., Butnor, J. R., Drake, B. G. (2007). Effect of elevated CO₂ on coarse-root biomass in Florida scrub detected by ground-penetrating radar. *Ecology*, 88 (5), 1328–1334. <https://doi.org/10.1890/06-0989>
- Tanikawa, T., Hirano, Y., Dannoura, M., Yamase, K., Aono, K., Ishii, M., Igarashi, T., Ikeno, H., Kanazawa, Y. (2013). Root orientation can affect detection accuracy of ground-penetrating radar. *Plant and Soil*, 373, 317–327. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1798-6>
- Torgovnikov, G. I. (1993). *Dielectric properties of wood and wood-based materials*. Berlin: Springer.
- Vladov, M. L. and Sudakova, M. S. (2017). *Ground penetrating radar. From physical foundations to advanced ones*. Tutorial. Moscow: GEOS Publ. (In Russian)
- Vennetier, M., Zanetti, C., Meriaux, P., Mary, B. (2015). Tree root architecture: new insights from a comprehensive study on dikes. *Plant and Soil*, 387, 81–101. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2272-9>
- Whalley, W., Binley, A., Watts, C., Shanahan, P., Dodd, I. C., Ober, E. S., Ashton, R. W., Webster, C. P., White, R. P., Hawkesford, M. J. (2017). Methods to estimate changes in soil water for phenotyping root activity in the field. *Plant and Soil*, 415, 407–422. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3161-1>
- Yamase, K., Tanikawa, T., Dannoura, M., Ohashi, M., Todo, C., Ikeno, H., Aono, K., Hirano, Y. (2018). Ground-penetrating radar estimates of tree root diameter and distribution under field conditions. *Trees*, 32, 1657–1668. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1741-9>
- Yeung, S. W., Yan, W. M., Hau, C. H. B. (2016). Performance of ground penetrating radar in root detection and its application in root diameter estimation under controlled conditions. *Science China Earth Sciences*, 59, 145–155. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5156-9>
- Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., Royet, P., Provansal, M. (2011a). Managing woody vegetation on earth dikes: Risks assessment and maintenance solutions. *Procedia Environmental Sciences*, 9, 196–200. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.11.030>
- Zanetti, C., Weller, A., Vennetier, M., Meriaux, P. (2011b). Detection of buried tree root samples by using geoelectrical measurements: A laboratory experiment. *Plant and Soil*, 339, 273–283. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0574-0>
- Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., Provansal, M. (2015). Plasticity of tree root system structure in contrasting soil materials and environmental conditions. *Plant and Soil*, 387 (1–2), 21–35. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2253-z>

Received: November 1, 2023

Accepted: February 15, 2024

Authors' information:

Pavel A. Ryazantsev — chthonian@yandex.ru

Aleksey V. Kabonen — alexkabonen@mail.ru