Вестник Томского государственного университета. Биология. 2020. № 51. С. 179–204

УДК 550.8; 550.73; 581.43
doi: 10.17223/19988591/51/10

П.А. Рязанцев[1], А.В. Кабонен[2], А.И. Родионов[1]

[1] *Карельский научный центр РАН, г. Петрозаводск, Россия*
[2] *Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Россия*

Определение архитектоники корневой системы деревьев методом георадиолокации

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания
Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН

Методом георадиолокации проведено изучение корневой системы двух образцов яблони домашней (Malus domestica) и обобщены данные о методике наблюдений и обработки данных при изучении архитектоники корней. Показана возможность выделения погребенных объектов размерами от 1,5 до 5 см при использовании георадаров с зондирующей частотой 1–2 ГГц, что сопоставимо с ожидаемым размером скелетных корней. Выполнены полевые наблюдения георадаром ОКО-2 с антенным блоком частотой 1 700 Гц по исследованию архитектоники двух образцов яблонь, без применения способа раскопки, с целью определения влияния почвенно-гидрологических условий на процессы корнеобразования. По гиперболам дифрагированной волны на радарограммах определены местоположения скелетных корней исследуемых образцов, совокупность которых отражает распределение корневых систем в пространстве. При помощи трехмерных моделей проанализировано взаимоотношение морфологии кровли корненепроницаемых грунтов и корневой архитектуры образцов. Установлена трансформация корневой системы и наземной части деревьев в зависимости от положения подстилающих кристаллических пород. Обнаружено, что неглубокое залегание скальных грунтов приводит к изменению формы корневой системы от усечённого конуса к поверхностной.

Ключевые слова: *Malus domestica; георадиолокация; корневая архитектоника; радарограммы; корненепроницаемый горизонт.*

Введение

Корневая система является критически важной составляющей любого дерева, отвечая за функции питания, запасания полезных веществ и физического закрепления в грунте. Под архитектоникой корневой системы подразумевается конфигурация корней в пространстве, а её формирование зависит от множества факторов, таких как вид растения, тип вмещающих грунтов, получаемое питание и т.д. [1]. Несмотря на важность изучения этого органа в контексте процессов развития и жизнедеятельности дерева, представление о структуре корневого аппарата зачастую неполное, в том числе и

вследствие ограничений доступных методов исследований. Основой экспериментального изучения корневых систем растений служит способ их раскопки [2, 3]. Однако это наносит значительный ущерб подземному пространству, а также самим растениям и в большинстве случаев приводит к их гибели. В некоторых случаях в черте города или на особо охраняемых природных территориях выполнение подобных работ невозможно или запрещено. Кроме того, данный способ требует значительных временных и физических затрат.

Изучение корневых систем деревьев на сегодняшний день является актуальной задачей, и для ее решения систематически привлекаются новые дистанционные методы, как лабораторные, так и полевые [4]. Например, получен ряд значимых результатов по использованию пространственных моделей для оценки влияния наклона поверхности грунта на процессы формирования корневой системы в рамках борьбы с процессами эрозии [5, 6]. К неразрушающим способам анализа корневой архитектоники относится и применение геофизических методов, в частности, георадиолокации, которая базируется на изучении закономерностей распространения высокочастотных электромагнитных волн в почвенно-грунтовом массиве [7–9]. Георадиолокацию в качестве средства описания корневых систем древесных растений начали применять с конца 90-х гг., когда была показана принципиальная возможность локализации положения отдельных корней георадаром [10]. Дальнейшие исследования в этом направлении продемонстрировали достаточно убедительные примеры определения по данным георадиолокации диаметра скелетных корней и как следствие возможность оценки их биомассы [11–13]. При этом значительная часть работ касается вопросов физических ограничений и разрешающей способности георадиолокации [14, 15].

Корневая система растений развивается по наследственно закреплённой схеме, но имеет тенденцию к адаптации под влиянием окружающей среды, в том числе вследствие взаимодействия с вмещающими грунтами, что проявляется, например, в процессах гидротропизма и хемотропизма [16]. Одним из природных факторов, оказывающих влияние на рост, является уровень залегания корненепроницаемых горизонтов, вследствие чего изменяется как структура корневой системы, так и надземная часть растений.

Изучение развития корневой системы в почвенно-грунтовом массиве относится к области научных и практических интересов для плодовых растений, среди которых одно из доминирующих мест занимает яблоня домашняя (*Malus domestica* Borkh.) [17]. Цель данной работы – продемонстрировать возможность исследования корневой архитектоники взрослых деревьев методом георадиолокации без применения способа раскопки. Кроме того, поставлена задача по определению пространственной конфигурации корневой системы в зависимости от глубины залегания кристаллических пород и оценке влияния подобных изменений на развитие надземной части деревьев.

Материалы и методики исследования

Метод георадиолокации основывается на излучении наносекундных электромагнитных импульсов определенной частоты в зондируемую среду с последующей регистрацией и анализом сигнала, отраженного от внутренних границ и локальных неоднородностей [18, 19]. К основным характеристикам, отвечающим за скорость распространения и затухания электромагнитной волны в грунтах, относятся относительная диэлектрическая проницаемость и электрическая проводимость, которые в свою очередь зависят от ряда физических свойств зондируемого грунта: минерального и гранулометрического состава, влажности, плотности, содержания органического вещества и т.д. Вариации таких параметров определяют, насколько глубоко и как точно можно выявить отражающие границы в грунтовом массиве. Важным параметром в георадиолокации служит частота излучаемого сигнала, с которой связаны глубинность и разрешающая способность зондирования. Существует оптимальный диапазон частот, так называемое «георадарное плато», в интервале частот от 10 до 2 000 МГц [20]. В методе георадиолокации используются сверхширокополосные импульсы, частотный спектр которых в приёмнике представляет собой произведение исходного зондирующего сигнала на частотные характеристики среды. Таким образом, существует принципиальная возможность спектрального анализа регистрируемого сигнала для определения параметров зондируемой среды [19]. Например, повышение электрической проводимости грунта за счёт увлажнения приводит к увеличению низкочастотной составляющей сигнала вследствие затухания высокочастотных гармоник.

Для выполнения полевой съёмки используется георадар – прибор, который состоит из передающей и принимающей антенны с фиксированной центральной частотой, блока регистрации и обработки. Наземные георадиолокационные (георадарные) измерения проводятся вдоль профильной линии или по системе профилей. Конфигурация сети наблюдений зависит от характера, размеров и глубины исследуемых границ и объектов. Принимаемый сигнал регистрируется как функция изменения амплитуды отражённого электромагнитного импульса во времени – георадарная трасса, совокупность таких трасс формирует радарограмму. Прослеживая на радарограмме ряд одинаковых импульсов на соседних трассах, так называемую ось синфазности, можно проследить отражающую границу (рефлектор). Кроме отраженных, существуют и другие типы регистрируемых волн, например дифрагированная. Её отличие в том, что электромагнитный импульс, отражённый от точки дифракции к поверхности, не подчиняется закону отражения, требующего равенства углов падения и отражения. Точками дифракции выступают локальные объекты: валуны, корни, подземные коммуникации, размеры которых сравнимы или меньше длины волны зондирующего сигнала [19]. На радарограммах дифрагированные волны выделяются по своему

годографу (зависимость времени прихода отражённой волны от пройденной дистанции) в форме гипербол, поиск и локализация которых является важной составляющей интерпретации (рис. 1). Вершина гиперболы указывает на положение искомого локального объекта, а по наклону «крыльев» гиперболы определяется скорость электромагнитной волны во вмещающей среде, что важно в случаях отсутствия информации о строении и электрофизических параметрах изучаемого разреза.

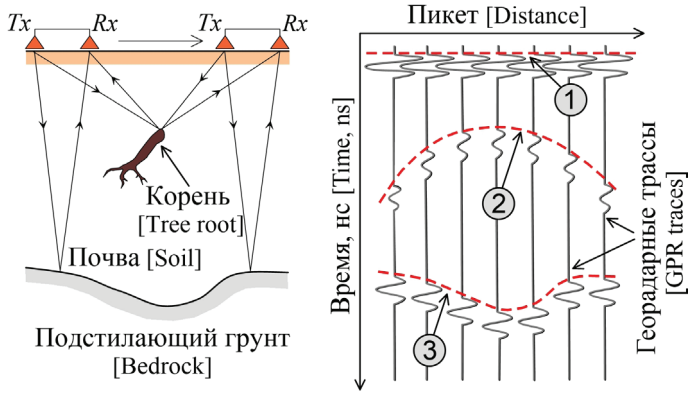


Рис. 1. Схема выполнения георадарной съемки (Tx – источник, Rx – приемник) и регистрируемая радарограмма, где: *1* – прямая волна в грунте; *2* – гипербола дифрагированной волны на локальном объекте; *3* – рефлектор от подстилающих пород [**Fig. 1.** Schematic illustration of GPR reflection profiling (Tx - Transmitter, Rx - Receiver) and recorded radargram, where: 1 - Direct ground wave; 2 - Hyperbola of the diffracted wave; 3 - Bedrock reflections]

Глубина залегания отражающих границ (Z) рассчитана следующим образом:

$$Z = \frac{V \times t}{2}, \tag{1}$$

где V – скорость электромагнитной волны; t – время прихода импульса.

Скорость распространения электромагнитной волны в геологической среде определяется на основе параметров среды:

$$V = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}\left(\sqrt{1+\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2}+1\right)}}, \tag{2}$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость; σ – электропроводность; ω – угловая частота ($\omega = 2\pi f$, f – центральная частота сигнала).

Так как большинство грунтов – диэлектрики ($\mu = 1$) и имеют относительно невысокую проводимость ($\sigma << \omega\varepsilon$), необходимо применять сокращенную формулу:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}, \tag{3}$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость; с – скорость света в вакууме.

Условием образования отраженного сигнала является существование контраста электрофизических свойств грунтов, а параметром, определяющим его интенсивность, служит коэффициент отражения ($K_{отр}$):

$$K_{отр} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}, \tag{4}$$

где ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость верхнего слоя; ε_2 – относительная диэлектрическая проницаемость нижнего слоя.

Чем ближе значение коэффициента к единице, тем ярче проявляется рефлектор на радарограмме.

Одним из показателей применимости метода для поиска локальных объектов служит разрешающая способность, определить которую можно через длину волны (λ):

$$\lambda = \frac{V}{f_c}, \tag{5}$$

где V – скорость электромагнитной волны; f_c – центральная частота сигнала.

Вертикальная (Δr) и горизонтальная (Δl) разрешающие способности определены следующими соотношениями:

$$\Delta r \geq \frac{\lambda}{4} \qquad \Delta l \geq \sqrt{2\lambda h}, \tag{6}$$

где h – глубина залегания отражающего объекта.

Для относительно низких георадарных частот разрешающая способность составляет десятки сантиметров, тогда как для самых высоких разрешение – первые сантиметры. Например, заявленная характеристика для антенного блока с центральной частотой 150 МГц составляет 35 см, а для антенны с частотой 1 500 МГц равна 5 см. Точность определения положения отражающего объекта также зависит от шага измерения по профилю и дискретизации сигнала.

Георадиолокация при исследовании корневых систем деревьев. С точки зрения георадиолокации древесные корни выступают в качестве локальных линейных объектов, т.е. их поисковый признак, как уже отмечалось выше, – гипербола дифрагированной волны. Относительная диэлектрическая проницаемость древесины зависит от ряда факторов, основные из которых водонасыщенность и плотность, при этом существует зависимость от температуры, частоты импульса, содержания целлюлозы и т.д. Как показывают лабораторные исследования, нормальное значение для сухой (влажность менее 30%) древесины ε<10, тогда как древесина с влажностью порядка 80–90% может достигать значений ε = 50 и более [21]. Для сравнения: нор-

мальные значения песка составляют 4–7 единиц в сухом состоянии и 5–15 во влажном [19]. Следовательно, существующий контраст свойств обеспечивает формирование рефлекторов. Особенно ярко это проявляется в засушливых регионах, где корневые системы растений более мощные и занимают большую территорию, а также активней депонируют воду на фоне сухих почв [22]. Известно, что отчётливо гиперболы на радарограмме проявляются, когда влажность корней на 35% (и более) выше относительно фоновых значений, при разности менее 20% корни не выявляются [23, 24].

Лабораторное моделирование позволило определить, как изменяется волновое поле георадиолокации в зависимости от диаметра и глубины залегания корня, а также выявить возможные подходы для оценки диаметра корней в естественном залегании исходя из параметров георадарного сигнала [15, 24–26]. При этом широкая вариация диаметра и протяжённости корней у деревьев затрудняет получение однозначных критериев для их идентификации. В табл. 1 представлены обобщённые данные по изучению корневых систем методом георадиолокации. Сопоставление результатов исследований показало существование вариативности как по выявленному диаметру, так и максимальной глубине, что обусловлено видом деревьев и типом вмещающего почвенно-грунтового массива. Отмечается, что минимальный диаметр корней, однозначно фиксируемый высокочастотными антенными блоками, составляет 0,5 см [12, 15, 25]. Дополнительно к факторам, определяющим волновую картину, относится угол пересечения георадарным профилем направления горизонтального роста корня, при углах <45° и >135° регистрируемая гипербола искажается, а амплитуда отраженного сигнала снижается [27]. Следовательно, при исследованиях необходимо подбирать геометрию профилей наблюдений в зависимости от конфигурации корневой системы [28], например, использовать прямоугольную [29] или радиальную [30] сеть профилей.

Выявлено влияние сезона на детальность георадарных исследований, в теплый (летний) период выделяется большее число корней на глубинах до 0,5 м, тогда как в холодный (зимний) период возрастает в 2 раза и более количество корней, локализованных ниже 0,5 м от поверхности [31]. Это явление объяснено повышенным содержанием воды в корнях летом и как следствие ростом их контраста в сравнении с вмещающими почвами. В свою очередь зимой происходит возрастание скорости электромагнитной волны в совокупности с уменьшением затухания в почвах из-за промерзания (т.е. происходит увеличение эффективной глубины метода). Также точность идентификации корней зависит от мощности и состава лесной подстилки [32]. По существующим оценкам, при помощи георадара можно выявить расположение порядка половины корней из общей структуры корневой системы дерева – 48% [33] и 58% [34]. При этом в верхнем интервале <50 см выявленных корней больше в сравнении с нижележащими горизонтами – 49 к 35% [33] и 60 к 35% [34].

Экспериментальная площадка и образцы деревьев. Исследования проведены в августе 2019 г. на территории Ботанического сада Петрозаводского

государственного университета, расположенного в г. Петрозаводске (рис. 2). В геологическом плане эта территория представляет собой ось антиклинальной складки, проявленной в виде мощного крутосклонного кряжа субширотного простирания с изрезанным рельефом. Для рассматриваемого участка характерно близкое залегание кристаллических пород, которые представлены порфиритами и метатуфами. Крутой рельеф не способствовал аккумуляции рыхлых отложений, при этом в самом почвенном покрове содержатся обломки скальных горных пород. В четвертичных отложениях территории преобладает супесчаная и песчаная морена с мощностью не более 2 м, а значительные площади вообще лишены четвертичного покрова [35]. Структура почвенного покрова Ботанического сада неоднородна и усложняется с запада на восток, основная масса почв представлена буроземами грубогумусовыми супесчаными. Отличительными чертами этих почв являются: наличие гумус-продуктивного горизонта с содержанием углерода 7–12%, далее углерод убывает с глубиной до значений менее 1%, средний гранулометрический состав – 87% песка и 13% глины, весь профиль ожелезнён и обогащен дериватами из подстилающих пород [36].

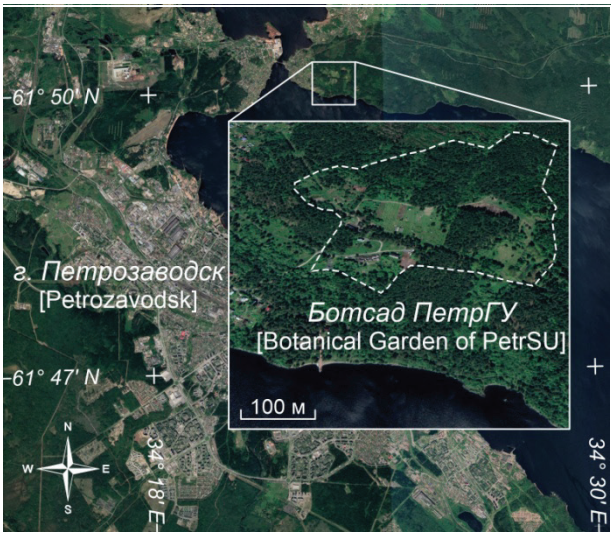


Рис. 2. Расположение участка работ
[**Fig. 2.** Location of the site research area]

Для эксперимента выбраны две площадки на расстоянии около 500 м, на каждой из которых росли одновозрастные деревья – яблони домашние *Malus domestica* Borkh. Условия произрастания яблонь, такие как почвенный состав, количество осадков, температура, освещенность и уровень ветра, равноценны. На каждой площадке эксперимента выбрано отдельно стоящее дерево со средними значениями биометрических показателей (табл. 2).

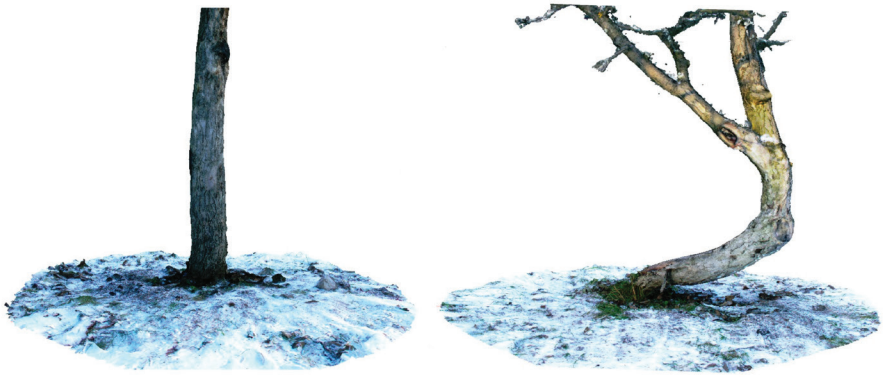
Таблица 1 [Table 1]

Эффективные диаметр и глубина обнаружения корней методом георадиолокации [Effective diameter and depth of root detection by GPR]

Объект исследования [Object of the research]	Тип грунта [Soil type]	Частота антенны, МГц [GPR frequency, MHz]	Диаметр корней, см [Root diameter, cm]		Глубина корней, см [Root depth, cm]	
			Min	Max	Min	Max
Сосна кедровидная *Pinus cembroides* Zucc. [8]	Горные щебнисто-органогенные почвы с содержанием орг. до 60% [Shallow rocky soils with organic matter up to 60%]	800	0,6	4,0	1	40
Криптометрия *Cryptomeria japonica* (L.f.) D. Don [15]	Песчаные почвы [Sandy soils]	900	1,9	7,8	30	80
Персик *Prunus persica* (L.) Batsch [37]	Супесь с содержанием песка 85% и глины 15% [Faceville fine sandy loam with 85% of sand and 15% of clay]	900	1,7	3,2	н/д	40
Дуб Дугласа *Quercus douglasii* Hook.&Arn. Сосна Сабина *Pinus sabiniana* Douglas ex D.Don [38]	Каштановые почвы, суглинистые [Auburn-Exchequer soils]	1 000	1,3	10,0	8	35
Тополь дельтовидный *Populus deltoids* W. Bartram ex Marshall [11]	Песчаные почвы с содержанием песка 90% и глины 10% [Lakeland soils containing 90% of sand and 10% of clay]	1 500	0,6	1,7	н/д	27
Сосна ладанная *Pinus taeda* L. [11]	Песчаные почвы с содержанием песка 85–92% и глины 5–15% [Wakulla soils containing 85-92% of sand and 8-15% of clay]	1 500	0,5	6,5	н/д	50
Вяз приземистый *Ulmus pumila* L. [25]	Песчаная дюна с содержанием песка 95% и глины 5% [Silver sand containing 95% of sand and 5% of clay]	2 000	0,5	3,5	10	80
Дуб миртолистный *Quercus myrtifolia* Willd. [12]	Подзол с содержанием песка 90% и глины 10% [Spodosol containing 90% of sand and 10% of clay]	2 000	0,5	3,5	н/д	60

При этом плотность и шаг посадок на этих площадках исключали срастание корневых систем у рядом стоящих деревьев. Выбор этих двух конкрет-

ных объектов обусловлен внешними отличиями. Одно из растений имеет выраженную сложную кривизну ствола и меньшую высоту по сравнению со вторым, условно-нормальным (рис. 3).



a b

Рис. 3. Образцы обследуемых яблонь: *a* – № 1 с первой площадки; *b* – № 2 со второй площадки (фотографии А.В. Кабонена)
[**Fig. 3.** Test samples of apple trees: *a* - from Plot 1, *b* - from Plot 2 (Photos by Alexey Kabonen)]

Таблица 2 [Table 2]

Биометрические показатели исследуемых деревьев
[Biometric indicators of the test trees]

Биометрические показатели [Biometric indicators]	Образец № 1 [Sample 1]	Образец № 2 [Sample 2]
Высота дерева, см [Tree height, cm]	500	350
Диаметр кроны, см [Crown diameter, cm]	400	500
Диаметр ствола у основания, см [Diameter of the trunk base, cm]	49	48
Диаметр ствола на высоте 1,3 м [Trunk diameter at a height of 1.3 m]	36	38

Среднегодовые фенологические фазы у исследуемых образцов проходили параллельно, возраст деревьев – 29 лет, значительной разницы в количестве ежегодно вызревающих плодов у исследуемых растений не выявлено. На базе существующих отличий выдвинута гипотеза о влиянии глубины залегания скальных пород на формирование корневой системы и как следствие на процессы развития ствола и кроны дерева. Известен эффект специфического протекания процессов корнеобразования в зависимости от почвенно-гидрологических условий. В случае почвенного покрова малой мощности и наличия корненепроницаемого горизонта происходит прекращение развития стержневого корня с интенсификацией роста корней горизонтальной ориентации, структура корневой системы принимает выраженный поверхностный характер, зачастую имея форму усеченного конуса [1]. Кроме того, считается, что невозможность проникновения вертикальных корней вглубь

не только меняет структуру корневой системы, но может повлечь за собой изменения и слабый рост надземной части, а также раннее отмирание плодовых деревьев [39].

По литературным данным, условно-нормальная корневая система яблони домашней имеет вид, как показано на рис. 4. Отмечается преобладание скелетных корней горизонтального направления и расположение их основной массы на глубинах до 1 м от уровня поверхности. Горизонтальные скелетные корни характеризуются диаметром около 1–2 см, а вертикальные – порядка 4–5 см. Представленная схема описывает общий случай, тогда как для северных территорий (к которым относится и Республика Карелия) характерно распределение основной массы корней в интервале 25–50 см от поверхности [Там же]. Имеющиеся предпосылки позволяют сделать вывод о применимости георадара для сбора данных, так как глубина залегания корневой системы у яблони домашней соотносится с глубиной зондировании высокочастотного антенного блока (см. табл. 1), а также предположить высокую информативность метода из-за большого количества субгоризонтальных корней, которые проще выявлять на радарограммах.

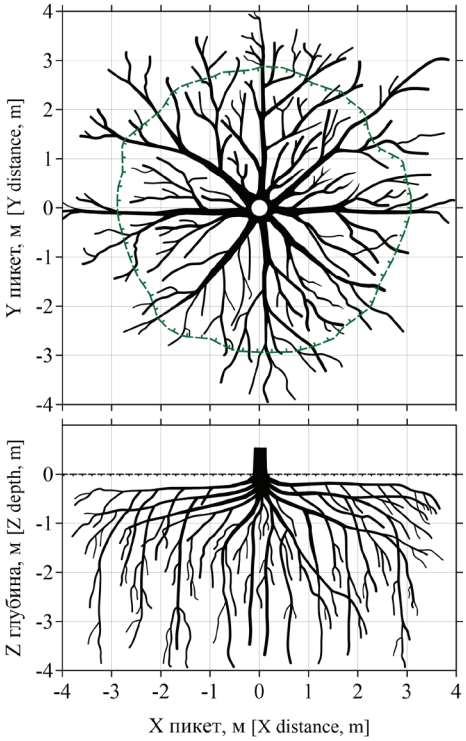


Рис. 4. Горизонтальная и вертикальная проекции корневой системы яблони домашней возрастом 20 лет, по данным В.А. Колесникова (1974)
[**Fig. 4.** Horizontal and vertical plane of the apple tree root system aged 20 years, according to Venedikt Kolesnikov (1974)]

Методика эксперимента. Полевые наблюдения проведены исходя из имеющихся данных о строении корневой системы яблони домашней. Для этого вида характерно наличие в горизонтальной проекции четырех перпендикулярных и четырех диагональных скелетных корней, а также распределение корней в вертикальной проекции на глубине от 20 до 60 см (см. рис. 4). Вследствие этого измерения выполнены по регулярной прямоугольной сети с расстоянием между профилями 50 см (рис. 5). Каждый профиль начинается с отметки 0 см и увеличивался до пикета 600 см. Основная масса корней у яблони домашней залегает в пределах кроны, поэтому размер каждого участка съемки составил 600×600 см. Сбор данных выполнен георадаром ОКО-2 «Логис-Геотех» (Россия) с антенным блоком, имеющим центральную частоту 1 700 МГц. Указанный антенный блок имеет фиксированную базу, шаг сканирования по профилю составил 2 см, а временная разверстка 32 нс, что обеспечило глубину исследований до 1 м. В результате для каждого образца получен набор из 26 профилей: 13 горизонтальных (направление X) и 13 вертикальных (направление Y).

Обработка полученных радарограмм выполнена стандартно [22]: частотная фильтрация и вычитание средней составляющей сигнала для чистки записи; выделение областей расположения полезного сигнала; поиск гипербол дифрагированной волны; выполнение процедур синтеза апертуры и преобразования Гильберта (рис. 6). Операция синтеза апертуры повышает разрешающую способность записи и уменьшает интенсивность «крыльев» гипербол, что обеспечивает лучшую локализацию местоположения отдельных корней. Преобразование Гильберта позволяет представить георадарную трассу как аналитический сигнал (огибающую), который характеризует мгновенные амплитуды и позволяет оценить энергию (интенсивность) отражений в конкретной области. Участки высоких энергий соответствуют контрастным изменениям электрофизических свойств. Из практики известно, что достаточно крупные корни могут отображаться в волновом поле георадиолокации набором отражений, например от верхней и нижней части, поэтому их положение корректно определять по наибольшим амплитудам [15, 23].

Для перехода от временной формы георадарной записи к разрезу глубин необходимо присвоить относительную диэлектрическую проницаемость ε для каждого отдельного слоя среды, в которой распространялся сигнал. Используя формулу (3), определить скорость V, а по формуле (1) рассчитать глубину зондирования. Величина ε (или V) определяется по табличным значениям с использованием маркерных рефлекторов с известной глубиной залегания или рассчитывается по наклону «крыльев» гипербол дифрагированной волны [18–20]. Последний способ рассматривается как наиболее удобный, так как не требует дополнительных работ и обеспечивает достаточную точность определения искомых значений. Условием его применимости является наличие на записи чётких гипербол. В рамках исследований

корней использована программа сбора и обработки данных георадиолокации GeoScan32 «Логис-Геотех» (Россия), где реализована функция анализа гипербол. По результатам работ для вмещающих почв ε составила 9 единиц, а для подстилающих метатуфов ε = 6 единиц. Это позволило определить скорость $V_{почв} \approx 10$ см/нс и глубину зондирования Z = 70–90 см. Значение $K_{отр}$ (4) для границы почва – скальный грунт составляет 0,1, что свидетельствует о существовании рефлектора средней интенсивности. Длина зондирующей электромагнитной волны в исследуемых почвах составляет ~5 см (5), это позволяет сделать вывод о возможности локализации объектов размерами от 1,2 до 5,0 см (6). Указанный диапазон сопоставим с ожидаемым размером скелетных корней яблони домашней.

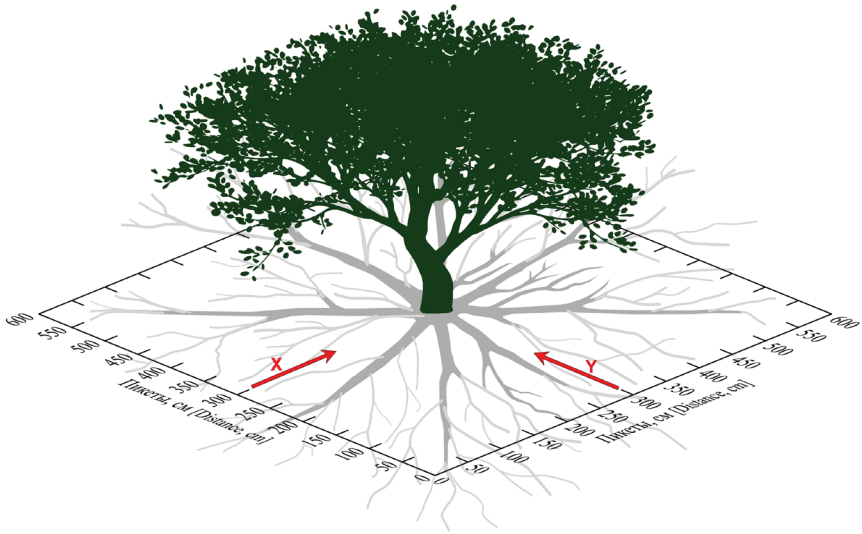


Рис. 5. Схема расположения профилей наблюдения в обследуемой области
[**Fig. 5.** Setup of GPR profiles in the study area]

После обработки на каждом профиле по гиперболам определены местоположения корней с координатами X, Y, Z. Так как нет однозначных параметров, чтобы отличить отражение от корня и, например, валуна, пикировались все гиперболы. Предполагается, что из-за протяженности корни имеют подавляющее количество отражений на радарограммах, а отражения от иных объектов статистически не значимы. В силу различных факторов существует неопределенность для параметров сигнала, поэтому нет возможности достоверно проследить единичный корень. Вследствие чего выполнен анализ конфигурации некоторого облака точек, которое в первом приближении пространственно соответствует объёму среды, занимаемому корневой системой. Кроме местоположений корней определена поверхность скальных грунтов, контрастно выделяющаяся от вышележащих рыхлых грунтов по протяженной оси синфазности.

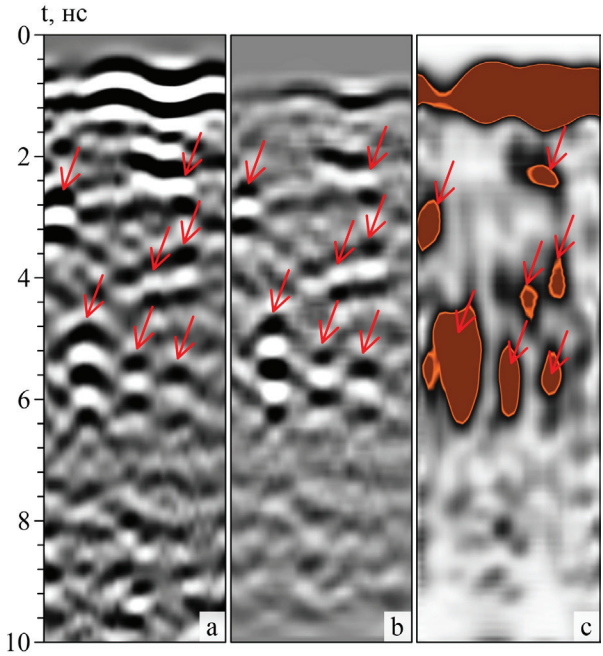


Рис. 6. Пример процедур обработки радарограммы: *a* – поиск гипербол; *b* – синтез апертур; *c* – расчет энергограммы (стрелками указано предполагаемое местоположение корней)
[**Fig. 6.** An example of GPR transect processing procedures: a - Search of hyperbolas**;** b - Aperture synthesis; c - Calculation of signal amplitudes (arrows indicate the location of the roots)]

Результаты исследования и обсуждение

Выполненные работы обеспечили получение набора радарограмм, по которым локализованы гиперболы дифрагированной волны, а также прослежена граница кристаллических пород. Рассмотрим результаты на примере двух перпендикулярных профилей, расположенных в центре участка для каждого из образцов (рис. 7). Радарограммы для образца № 1 характеризуются хаотичным волновым полем со временами регистрации полезного сигнала до 15 нс. Граница скальных пород идентифицируется по невыдержанной оси синфазности и изменению характера волнового поля – отсутствие интенсивных отражений и повышение затухания сигнала. Для профиля по направлению X (рис. 7, *a*) глубина залегания скальных пород составляет 50–72 см, гиперболы фиксируются на пикетах от 25 до 454 см и в интервале глубин (Z) 2,5–61,7 см. Профиль по направлению Y (рис. 7, *b*) характеризуется сходной глубиной залегания скальных пород 54–70 см, гиперболы выявлены на пикетах 22–544 см и в интервале Z = 2,7–61,7 см. Далее обратимся к результатам исследованиям образца № 2. Радарограммы на этом участке имеют меньший временной период полезного сигнала порядка 12 нс. Грани-

ца скальных пород для профиля по направлению X установлена в интервале глубин 32–53 см, гиперболы выявлены в диапазоне пикетов 30–450 см и Z = 2,3–46,0 см (рис. 7, *c*). Перпендикулярный профиль Y (рис. 7, *d*) обладает схожими параметрами: скальные породы прослежены на глубине 40–52 см, гиперболы на пикетах 76–518 см и Z = 3,0–42,7 см.

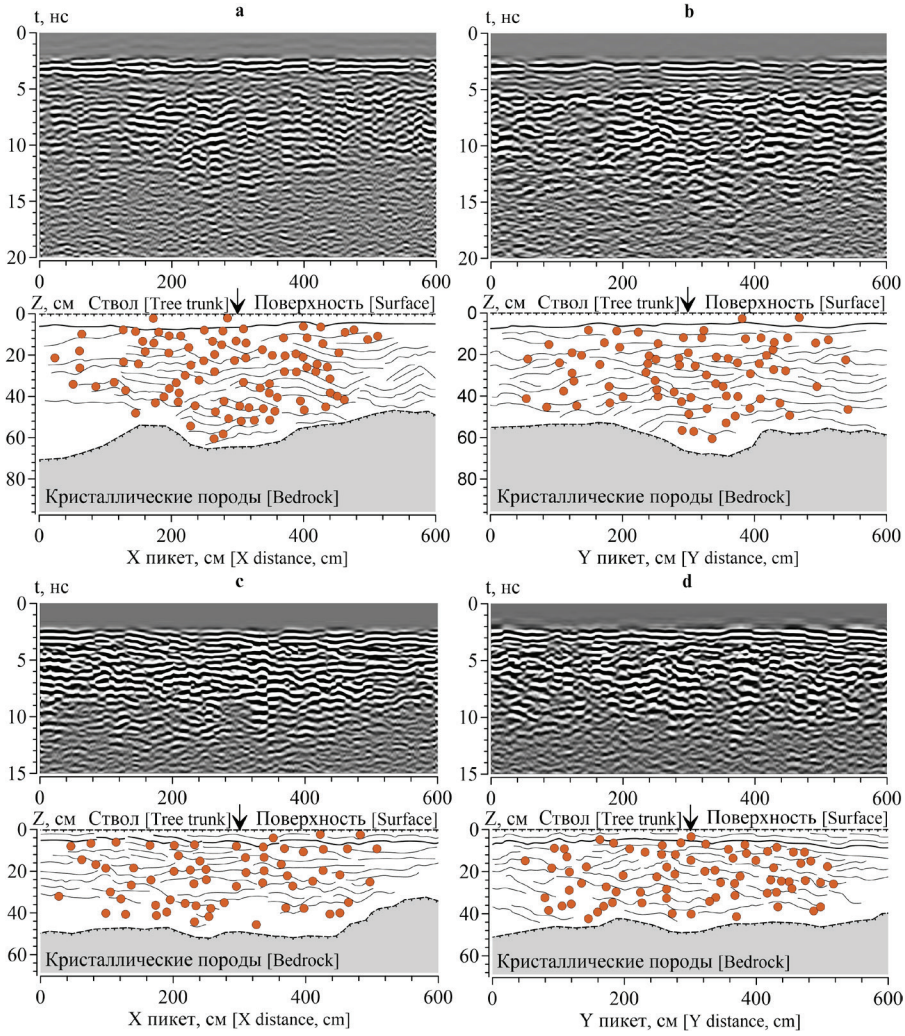


Рис. 7. Центральные радарограммы для образца № 1 по направлению X (*a*), Y (*b*) и образца № 2 по направлению X (*c*), Y (*d*)
[**Fig. 7.** Central GPR profiles for sample 1 in the direction X (a), Y (b) and sample 2 in the direction X (c), Y (d)]

В общем виде можно заключить, что почвенно-грунтовые условия объекта № 1 и объекта № 2 кардинально отличаются. В первом случае средняя

глубина залегания кристаллических пород составляет 60 см и наблюдается конусообразное уменьшение количества выявленных гипербол с глубиной. Во втором случае средняя глубина равна 45 см, а основная масса гипербол расположена в первых 30 см. Отметим, что на участке образца № 1 обнаружено 366 гипербол, а на участке образца № 2 – 520 гипербол. Так как скелетные корни из-за своей протяженности формируют подавляющее количество гипербол во всех проекциях, гиперболы приняты в качестве признаков их местоположения. Как отмечалось выше, в среднем регистрируется 40–50% корней от общего количества, поэтому пространственная структура корневых систем обследуемых яблонь описывается достаточно полно.

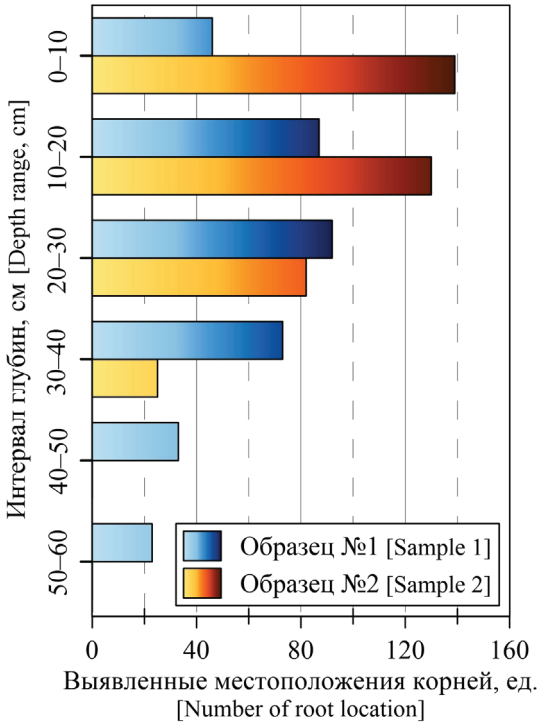


Рис. 8. Распределение выявленных местоположений корней по глубине
[**Fig. 8.** Distribution of the identified root locations in depth]

Распределение количества выявленных местоположений корней в зависимости от глубины с интервалом 10 см показано на рис. 8. Видно, что корневые системы исследуемых деревьев имеют ряд существенных отличий. Образец № 1 демонстрирует постепенное уменьшение количества корней с глубиной и согласное уменьшение занимаемой площади, также наблюдается их концентрация относительно штамба. Образец № 2 характеризуется множеством корней в верхней части разреза (0–30 см), занимающих значитель-

ную площадь, тогда как в самой нижней части их количество резко сокращается. Следует отметить, что распределение корневой массы по глубине для образца № 1 сопоставимо с оценкой В.А. Колесникова для яблонь северных территорий. В то же время в обоих случаях выявлена предрасположенность местоположений корней к областям погружения кровли кристаллических пород.

Один из способов оценить пространственную конфигурацию погребенного объекта – использовать проекции (срезы георадарных параметров на фиксированных глубинах. Для получения подобных срезов рассчитываются значения мгновенных амплитуд отраженного сигнала (энергограммы), что позволяет проследить положение электрофизических неоднородностей. Корни за счет своей водонасыщенности контрастны на фоне вмещающих грунтов, и это обеспечивает трассирование их положения за счет высокой интенсивности отражения сигнала. Подобный способ оценки использован для сосны ладанной (*Pinus taeda*), когда выявлялись корни диаметром более 2 см, и по результатам составлены карты их расположения [40]. В рамках выполненных исследований использовался схожий подход. Для обследуемых образцов получены проекции интенсивности амплитуды отражений на разных интервалах глубин (рис. 9). Следует отметить, что полученные результаты, в отличие от литературных данных, не позволяют показать отдельные корни в связи с отсутствием однозначных критериев для прослеживания, однако определенную полезную информацию содержат. Так, например, уровень Z = 20 см характеризуется наличием высокоэнергетических отражений, которые располагаются в большей части исследуемой площади, и это соответствует горизонту, наиболее насыщенному корнями. Для обследуемых растений картины схожие, площадь, в пределах которой установлены интенсивные отражения, для образца № 1 составляет 28,7 м^2, а для № 2 – 26,6 м^2. Иная картина наблюдается на глубине Z = 40 см: образцы отличаются как по интенсивности наблюдаемых отражений, так и по занимаемой площади. Выявленные изменения обусловлены уменьшением количества и, вероятно, среднего размера корней в этом интервале. Выделяется значительная разность площади, занятой интенсивными отражениями: 25,6 м^2 для образца № 1 и 16,9 м^2 для образца № 2. Данные факты свидетельствуют как о трансформации корневой системы яблони домашней с глубиной, так и об отличии архитектоники корневой системы рассматриваемых образцов из-за влияния почвенно-грунтовых условий.

Взаимоотношение морфологии кровли кристаллических пород и корневой системы исследуемых образцов хорошо наблюдается на трехмерных моделях. В рассматриваемом случае модели выполнены в виде облака точек – набора установленных местоположений корней в координатной системе X, Y, Z, совокупность которых, несмотря на неточность и приблизительный характер, в первом приближении позволяет пространственно отобразить корневую архитектонику исследуемых образцов (рис. 10). На текущем эта-

пе исследований проследить направление и размеры отдельного скелетного корня по набору выявленных местоположений не удалось. В перспективе есть предпосылки для определения геометрических параметров корней в естественном залегании. Отдельные примеры показывают такую возможность, но в частном случае изучения якорных корней крупных деревьев с диаметром ствола 1 м и высотой до 20 м [41].

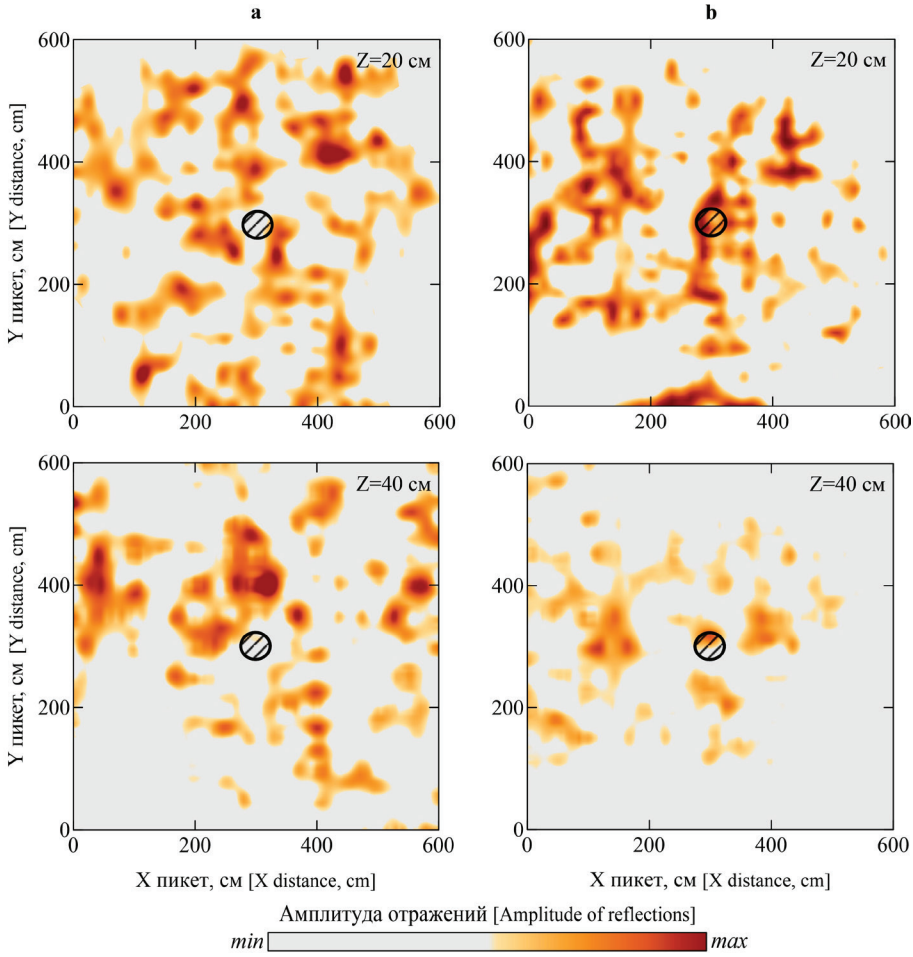


Рис. 9. Проекции амплитуд отражений на глубинах 20 и 40 см:
a – образец № 1; *b* – образец № 2 (кругом обозначено положение ствола)
[**Fig. 9** Projections of the reflection amplitudes at depths 20 and 40 cm: a - Sample 1; b - Sample 2 (the circle indicates the position of the tree trunk)]

Вместе с тем на основе модельных наблюдений экспериментально доказано наличие значимой корреляции между диаметром корней и характеристиками георадарной трассы: временных интервалов отражений [14],

значений максимальной амплитуды [42], а также взаимоотношений этих параметров, так называемых георадарных индексов [11, 25–29]. Данные исследования показывают размерность коэффициента корреляции георадарных индексов с диаметром и биомассой корней в пределах r = 0,5–0,8. Однако на практике использование такого подхода затруднительно, а результаты крайне неоднозначны. Кроме того, обработка большого количества полевых наблюдений из-за трудоёмкости требует привлечения специализированных автоматических процедур обработки радарограмм.

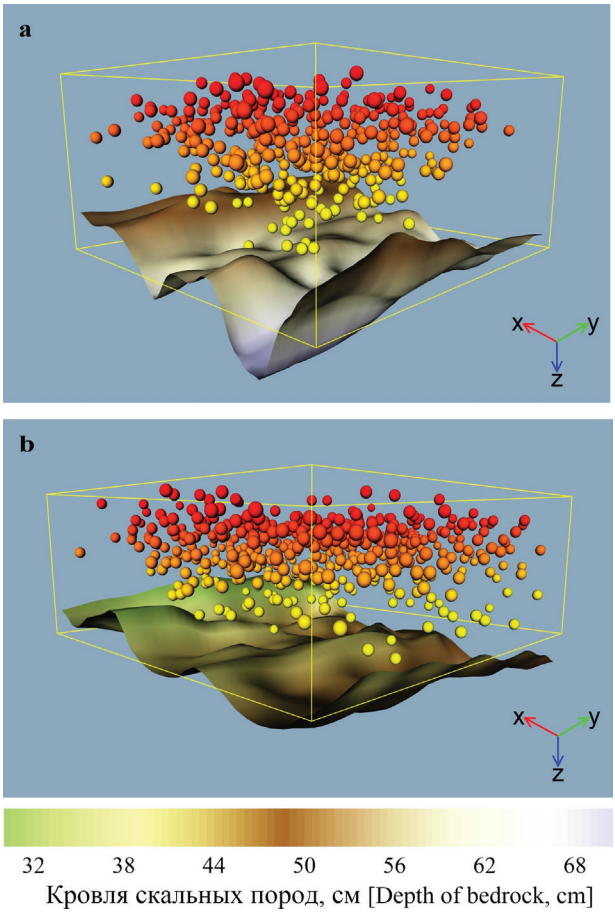


Рис. 10. Трехмерные модели корневой архитектоники: *a* – образец № 1; *b* – образец № 2
[**Fig. 10.** Three-dimensional models of the root architecture: a - Sample 1; b - Sample 2]

Полученные данные хорошо согласуются с выдвинутой гипотезой – неглубокое залегание скальных пород приводит к деформации конфигурации корневой системы, основная масса корней начинает концентрироваться в поверхностных слоях. Теоретически это может приводить к развитию сложной

кривизны древесного ствола, обусловленной фактором ветровальности или неприспособленности деформированной корневой системы поддерживать формирующуюся по наследственно-закрепленной схеме надземную часть растений, вследствие чего при условно-нормальном росте надземной части деформированная корневая система не в состоянии удерживать рост ствола в вертикальном направлении. Такие внешние условия приводят к наклонности и сложной кривизне, что и наблюдается визуально для образца № 2. Следует отметить, рассмотрение всего комплекса факторов, определяющих формирование древесного ствола, и обсуждение степени их значимости выходит за рамки представленных исследований.

Заключение

Выполненные экспериментальные работы продемонстрировали возможность описания корневой архитектоники дерева с использованием метода георадиолокации. Обобщенные данные показали, что предельный размер отдельных корней, возможных для определения, составляет 0,5 см, этот факт позволил в дальнейшем рассматривать скелетные корни как объект поиска. На примере изучения двух образцов яблони домашней проведено картирование структуры распределения корневой системы в почвенно-грунтовом массиве, также установлено влияние глубины залегания кровли кристаллических пород на онтогенез деревьев. По результатам исследований можно заключить, что георадиолокация является многообещающим методом изучения подземной части деревьев, обеспечивающим выполнение анализа корневой системы без экскавации. В перспективе подобные исследования имеют практическую значимость как для решения агротехнических и лесоустроительных задач, так и при контроле зеленых насаждений на урбанизированных территориях.

Литература

1. Калинин М.И. Корневедение. М. : Экология, 1991. 173 с.
2. Колесников В.А. Методы изучения корневой системы древесных растений. 2-е изд. М. : Лесная промышленность, 1972. 152 с.
3. Böhm W. Methods of studying root systems. Berlin : Springer, 1979. 188 p. doi: 10.1007/978-3-642-67282-8
4. Measuring Roots. An Updated Approach / Ed. Mancuso S. Berlin : Springer, 2012. 382 p. doi: 10.1007/978-3-642-22067-8
5. Dumroese1 R.K., Terzaghi M., Chiatante D., Scippa G.S., Lasserre B., Montagnoli A. Functional traits of *Pinus ponderosa* coarse roots in response to slope conditions // Frontiers in Plant Science. 2019. Vol. 10, № 947. PP. 1–12. doi: 10.3389/fpls.2019.00947
6. Montagnoli A., Terzaghi M., Chiatante D., Scippa G.S., Lasserre B., Dumroese R.K. Ongoing modifications to root system architecture of *Pinus ponderosa* growing on a sloped site revealed by tree-ring analysis // Dendrochronologia. 2019. Vol. 58. PP. 1–11. doi: 10.1016/j.dendro.2019.125650

7. Al Hagrey S.A. Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity // Journal of Experimental Botany. 2007. Vol. 58, № 4. PP. 839–854. doi: 10.1093/jxb/erl237
8. Rodríguez-Robles U., Arredondo T., Huber-Sannwald E., Ramos-Leal J.A., Yepez E.A. Technical note: Application of geophysical tools for tree root studies in forest ecosystems in complex soils // Biogeosciences. 2017. Vol. 14, № 23. PP. 5343–5357. doi: 10.5194/bg-14-5343-2017
9. Alani A.M., Lantini L. Recent advances in tree root mapping and assessment using non-destructive testing methods: a focus on ground penetrating radar // Surveys in Geophysics. 2020. Vol. 41. PP. 1–42. doi: 10.1007/s10712-019-09548-6
10. Hruška J., Čermák J., Sustek S. Mapping tree root systems with ground-penetrating radar // Tree Physiology. 1999. Vol. 19, № 2. PP. 125–130. doi: 10.1093/treephs/19.2.125
11. Butnor J.R., Doolittle J.A., Kress L., Cohen S., Johnsen K.H. Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States // Tree Physiology. 2001. Vol. 21, № 17. PP. 1269–1278. doi: 10.1093/treephs/21.17.1269
12. Stover D.B., Day F.P., Butnor J.R., Drake B.G. Effect of elevated CO_2 on coarse-root biomass in Florida scrub detected by ground-penetrating radar // Ecology. 2007. Vol. 88, № 5. PP. 1328–1334. doi: 10.1890/06-0989
13. Hirano Y., Yamamoto R., Dannoura M., Aono K., Igarashi T., Ishii M., Yamase K., Makita ., Kanazawa Y. Detection frequency of *Pinus thunbergii* roots by ground-penetrating radar is related to root biomass // Plant and Soil. 2012. Vol. 360. PP. 363–373. doi: 10.1007/s11104-012-1252-1
14. Barton C.V.M., Montagu K.D. Detection of tree roots and determination of root diameters by ground penetrating radar under optimal conditions // Tree Physiology. 2004. Vol. 24, № 12. PP. 1323–1331. doi: 10.1093/treephys/24.12.1323
15. Hirano Y., Dannoura M., Aono K., Igarashi T., Ishii M., Yamase K., Makita N., Kanazawa Y. Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar // Plant and Soil. 2009. Vol. 319. PP. 15–24. doi: 10.1007/s11104-008-9845-4
16. Фридрих Г., Нойманн Д., Фогль М. Физиология плодовых растений. М. : Колос, 1983. 416 с.
17. Шкура В.Н., Обумахов Д.Л., Лунева Е.Н. Геометрия корневых систем яблони. Новочеркасск : Лик, 2013. 124 с.
18. Ground penetrating radar theory and applications / Ed. Jol H.M. Amsterdam : Elsevier, 2009. 544 p.
19. Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений : учеб. пособие. М. : ГЕОС, 2017. 240 с.
20. Annan A.P. Ground penetrating radar principles, procedures and applications. Mississauga : Sensors&Software, 2003. 278 p.
21. Torgovnikov G.I. Dielectric properties of wood and wood-based materials. Berlin : Springer, 1993. 196 p.
22. Guo L., Chen J., Cui X.H., Fan B.H., Lin H. Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: A review // Plant and Soil. 2013. Vol. 362. PP. 1–23. doi: 10.1007/s11104-012-1455-5
23. Guo L., Lin H., Fan B., Cui X., Chen J. Forward simulation of root's ground penetrating radar signal: simulator development and validation // Plant and Soil. 2013. Vol. 372. PP. 487–505. doi: 10.1007/s11104-013-1751-8
24. Yeung S.W., Yan W.M., Hau C.H.B. Performance of ground penetrating radar in root detection and its application in root diameter estimation under controlled conditions // Science China Earth Sciences. 2016. Vol. 59. PP. 145–155. doi: 10.1007/s11430-015-5156-9
25. Cui X., Chen J., Shen J.S., Cao X., Chen X.H., Zhu X.L. Modeling tree root diameter and biomass by ground penetrating radar // Science China Earth Sciences. 2011. Vol. 54. PP. 711–719. doi: 10.1007/s11430-010-4103-z

26. Guo L., Lin H., Fan B., Cui X., Chen J. Impact of root water content on root biomass estimation using ground penetrating radar: Evidence from forward simulations and field controlled experiments // Plant and Soil. 2013. Vol. 371. PP. 503–520. doi: 10.1007/s11104-013-1710-4
27. Tanikawa T., Hirano Y., Dannoura M., Yamase K., Aono K., Ishii M., Igarashi T., Ikeno H., Kanazawa Y. Root orientation can affect detection accuracy of ground-penetrating radar // Plant and Soil. 2013. Vol. 373. PP. 317–327. doi: 10.1007/s11104-013-1798-6
28. Guo L., Wu Y., Chen J., Hirano Y., Tanikawa T., Li W., Cui X. Calibrating the impact of root orientation on root quantification using ground-penetrating radar // Plant and Soil. 2015. Vol. 395. PP. 289–305. doi: 10.1007/s11104-015-2563-9
29. Borden K., Isaac M., Thevathasan N., Gordon A., Thomas S. Estimating coarse root biomass with ground penetrating radar in a tree-based intercropping system // Agroforesty Systems. 2014. Vol. 88. PP. 1–13. doi: 10.1007/s10457-014-9722-5
30. Wu Y., Guo L., Cui X.H., Chen J., Cao X., Lin H. Ground penetrating radar-based automatic reconstruction of three dimensional coarse root system architecture // Plant and Soil. 2014. Vol. 383. PP. 155–172. doi: 10.1007/s11104-014-2139-0
31. Cui X., Liu X., Cao X., Fan B., Zhang Z., Chen J., Chen X., Guo L. Pairing dual-frequency GPR in summer and winter enhances the detection and mapping of coarse roots in the semi-arid shrublandin China // European Journal of Soil Science. 2019. Vol. 71, № 2. PP. 1–16. doi: 10.1111/ejss.12858
32. Tanikawa T., Ikeno H., Dannoura M., Yamase K., Aono K., Hirano Y. Leaf litter thickness, but not plant species, can affect root detection by ground penetrating radar // Plant and Soil. 2016. Vol. 408. PP. 271–283. doi: 10.1007/s11104-016-2931-0
33. Yamase K., Tanikawa T., Dannoura M., Ohashi M.,·Todo C., Ikeno H., Aono K.,·Hirano Y. Ground-penetrating radar estimates of tree root diameter and distribution under field conditions // Trees. 2018. Vol. 32. PP. 1657–1668. doi: 10.1007/s00468-018-1741-9
34. Borden K.A., Thomas S.C., Isaac M.E. Interspecific variation of tree root architecture in a temperate agroforestry system characterized using ground-penetrating radar // Plant and Soil. 2017. Vol. 410. PP. 323–334. doi: 10.1007/s11104-016-3015-x
35. Демидов И.Н., Лукашов А.Д. Рельеф и четвертичные отложения ботанического сада Петрозаводского государственного университета как основа его современных ландшафтов // Hortus Botanicus. 2001. Т. 1. С. 25–33.
36. Красильников П.В., Платонова Е.А. Почвы заповедной территории Ботанического сада ПетрГУ // Hortus Botanicus. 2001. Т. 1. С. 34–41.
37. Cox K.D., Scherm H., Serman N. Ground-penetrating radar to detect and quantify residual root fragments following peach orchard clearing // HortTechnology. 2005. Vol. 15. PP. 600–607. doi: 10.21273/HORTTECH.15.3.0600
38. Raz-Yaseef N., Koteen L., Baldocchi D.D. Coarse root distribution of a semi-arid oak savanna estimated with ground penetrating radar // Journal of geophysical research: Biogeosciences. 2013. Vol. 118, № 1. PP. 135–147. doi: 10.1029/2012jg002160
39. Колесников В.А. Корневая система плодовых и ягодных растений. М. : Колос, 1974. 509 с.
40. Simms J.E., McKay S.K., McComas R.W., Fischenich J.C. *In situ* root volume estimation using ground penetrating radar // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 2017. Vol. 22, № 3. PP. 209–221. doi: 10.2113/JEEG22.3.209
41. Altdorff D., Botschek J., Honds M., van der Kruk J. *In situ* detection of tree root systems under heterogeneous anthropogenic soil conditions using ground penetrating radar // Journal of Infrastructure Systems. 2019. Vol. 25, № 3. PP. 1–8. doi: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000501
42. Dannoura M., Hirano Y., Igarashi T., Ishii M., Aono K., Yamase K., Kanazawa Y. Detection of *Cryptomeria japonica* roots with ground penetrating radar // Plant Biosystems. 2008. Vol. 142, № 2. PP. 375–380. doi: 10.1080/11263500802150951

Поступила в редакцию 17.03.2020 г.; повторно 22.06.2020 г.;
принята 25.06.2020 г.; опубликована 25.09.2020 г.

Авторский коллектив:
Рязанцев Павел Александрович – канд. г.-м. наук, с.н.с. Отдела комплексных научных исследований, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (Россия, 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11).
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-1944-9479
E-mail: chthonian@yandex.ru
Кабонен Алексей Валерьевич – аспирант кафедры технологии и организации лесного комплекса, Институт лесных, горных и строительных наук, Петрозаводский государственный университет (Россия, 185910, г. Петрозаводск, пр-т Ленина, 33).
E-mail: alexkabonen@mail.ru
Родионов Александр Игоревич – м.н.с. лаборатории геофизики, Институт геологии – обособленное подразделение ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (Россия, 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11).
E-mail: fabian4695@gmail.com

Для цитирования: Рязанцев П.А., Кабонен А.В., Родионов А.И. Определение архитектоники корневой системы деревьев методом георадиолокации // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2020. № 51. С. 179–204. doi: 10.17223/19988591/51/10

For citation: Ryazantsev PA, Kabonen AV, Rodionov AI. Detection of the tree root system architecture using Ground penetrating radar. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology.* 2020;51:179-204. doi: 10.17223/19988591/51/10 In Russian, English Summary

Pavel A. Ryazantsev[1], Aleksey V. Kabonen[2], Aleksandr I. Rodionov[1]

[1]*Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation*
[2]*Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russian Federation*

Detection of the tree root system architecture using Ground penetrating radar

This paper presents the results of an experiment measuring the tree root system architecture using ground-penetrating radar. Despite the importance of this issue, the knowledge of the root system of trees remains incomprehensive due to various reasons including the limitations of research methods. The basic approach to the exploration of the root system of plants is the root zone excavation method. However, this method inflicts substantial damage to plants and can lead to their destruction. In some cases, excavation is impossible or prohibited, i.g. in cities or protected natural areas. Studying the tree root systems is an urgent issue at the moment and new methods are systematically used to tackle it. The non-invasive approach to study the root architecture includes using the methods of geophysics, ground-penetrating radar (GPR) in particular. The root system of plants tends to adapt to the environment, which includes interaction with the accommodating soil. One of the natural factors influencing the growth is the level of the impenetrable soil horizon, which changes both the structure of the root system and the aerial part of a plant. The aim of this paper is to study the root architecture of mature trees using GPR, rather than root excavation method, to determine its configuration depending on the bedding of bedrocks and to justify how changes in the bedrock depth affects the development of the aerial parts of trees.

The principle of GPR is to examine the propagation of an electromagnetic wave in a medium by emitting a probing signal and receiving a reflected signal. Underground objects such as roots are distinguished by diffracted waves (*See Fig. 1*). The summary

of literature data shows that roots up to 0.5 cm in diameter can be found by a high frequency antenna (*See Table 1*). We carried out a field experiment on an apple tree (*Malus domestica* Borkh) which grows on the territory of the Botanic Garden of Petrozavodsk State University (*See Fig. 2*). This territory is characterized by a thin soil cover and underlying moraine soils. Below are metatuff bedrocks. We studied two separate samples. The choice was made due to external differences (*See Fig. 3*). The trees growing on Plot 2 (Sample 2 of the experiment) have a conspicuous compound curvature of the trunk and a lower height than plants from Plot 1 - sample 1 (*See Table 2*). The two trees underwent annual average phenological stages simultaneously. They are 29 years old. No significant differences in the annual number of ripening fruits was revealed. Thus, the experiment was carried out on the two samples growing in equal conditions but having differences in appearance and biometrics. Literature data show that an apple tree usually has 4 perpendicular skeletal roots and 4 diagonal skeletal roots 1-2 cm in diameter in horizontal slice. As for vertical slice, tree roots usually lie at a depth of 20-60 cm (*See Fig. 4*).

The measurements were carried out with OKO-2 GPR by "Logis-Geotech" (Russia) with antenna unit (center frequency of 1700 MHz) on a regular rectangular grid with a space between profile lines of 50 cm. As a result, 26 profiles (13 horizontal and 13 vertical ones) were obtained for each sample (*See Fig. 5*). We processed the obtained radargrams using signal filtering operations, searching for the diffraction hyperbola, migration procedure to localize the source object and the Hilbert Transform to examine the energy of the reflections (*See Fig. 6*). The analysis of the hyperbolas has determined the relative permittivity of the studied soil and underlying metatuffs. It is 9 and 6, respectively. The electromagnetic wave length in the soil body is 5 cm, which implies the possibility to distinguish objects sized 1.5-5 cm. This range is consistent with the expected size of the apple tree taproots. After the processing of each profile, the roots were localized using hyperbolas and the surface of bedrocks was determined (*See Fig. 7*).

We found out that the soil profiles of the two experimental samples were different. In the first case, the average depth of bedrocks bedding is 60 cm, and there is a v-shaped decrease in the identified hyperbolas with depth. In the second case, the average depth is 45 cm and most of hyperbolas are located in the first 30 cm. The examination of the location of the roots in horizontal slices within an interval of 10 cm shows a change in the density of the roots distribution as we go deeper (*See Fig. 8*). The quantity of roots of Sample 1 gradually decreases with depth as well as the occupied area. In addition, the roots tend to concentrate near the trunk. Sample 2 has many roots in the upper part of the profile (0-30 cm) and they occupy a significant area. However, the quantity of roots in the lower part decreases sharply. In both cases, we detected a predisposition of the root locations to the areas of the immersion of the roof of the bedrocks. In addition, a study was conducted concerning the intensity of the reflection amplitudes of both samples at different depths (*See Fig. 9*). At the near-surface level (20 cm) there are high-energy reflections. They occupy most of the studied area, and this corresponds to a horizon full of roots. A different picture emerges at a depth of about 40 cm. The samples vary in both the reflection intensity and the occupied area. The revealed changes are due to the decrease in the roots quantity and apparently to the medium size of the roots. We examined the correlation between the morphology of the bedrocks top surface and the spatial root architecture of the samples with three-dimensional models made in the form of a cloud of points as a set of established root locations in the XYZ-coordinate system (*See Fig. 10*).

Our studies have demonstrated the possibility to describe the tree root architecture by means of GPR. Using the two samples of the apple tree as an example, the structure

of the root system in the soil-ground massif was determined. Also, we established the influence of the bedding roof depth of crystalline rocks on the ontogenesis of a tree. The results obtained prove that GPR is a promising method for studying the underground areas of trees, which provide the possibility to analyze the root system without excavation. Such studies may prove useful in the future for both solving agricultural technology and forest management tasks, as well as for green spaces control in urban areas.

The paper contains 10 Figures, 2 Tables and 42 References.

Key words: *Malus domestica*; ground penetrating radar; root architecture; radargrams; root impenetrable horizon.

Funding: The study has been supported by the current research project of the Department of Multidisciplinary Scientific Research, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences.

The Authors declare no conflict of interest.

References

1. Kalinin MI. Kornevedenie [Root study]. Moscow: Ekologiya Publ.; 1991. 173 p. In Russian
2. Kolesnikov VA. Metody izucheniya kornevoy sistemy drevesnykh rasteniy. 2-e izd. [Methods for studying the root system of woody plants. 2nd ed.]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ.; 1972. 152 p. In Russian
3. Böhm W. Methods of studying root systems. Berlin: Springer Publ.; 1979. 188 p. doi: 10.1007/978-3-642-67282-8
4. *Measuring Roots. An Updated Approach*. Mancuso S, editor. Berlin: Springer Publ.; 2012. 382 p. doi: 10.1007/978-3-642-22067-8
5. Dumroesel RK, Terzaghi M, Chiatante D, Scippa GS, Lasserre B, Montagnoli A. Functional traits of *Pinus ponderosa* coarse roots in response to slope conditions. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10(947):1-12. doi: 10.3389/fpls.2019.00947
6. Montagnoli A, Terzaghi M, Chiatante D, Scippa GS, Lasserre B, Dumroese RK. Ongoing modifications to root system architecture of *Pinus ponderosa* growing on a sloped site revealed by tree-ring analysis. *Dendrochronologia*. 2019;58:1-11. doi: 10.1016/j.dendro.2019.125650
7. Al Hagrey SA. Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity. *Experimental Botany*. 2007;58(4):839-854. doi: 10.1093/jxb/erl237
8. Rodríguez-Robles U, Arredondo T, Huber-Sannwald E, Ramos-Leal JA, Yepez EA. Technical note: Application of geophysical tools for tree root studies in forest ecosystems in complex soils. *Biogeosciences*. 2017;14(23):5343-5357. doi: 10.5194/bg-14-5343-2017
9. Alani AM, Lantini L. Recent advances in tree root mapping and assessment using non-destructive testing methods: A focus on ground penetrating radar. *Surveys in Geophysics*. 2020;41:1-42. doi: 10.1007/s10712-019-09548-6
10. Hruška J, Čermák J, Sustek S. Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Tree Physiology*. 1999;19(2):125-130. doi: 10.1093/treephys/19.2.125
11. Butnor JR, Doolittle JA, Kress L, Cohen S, Johnsen KH. Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree Physiology*. 2001;21(17):1269-1278. doi: 10.1093/treephys/21.17.1269
12. Stover DB, Day FP, Butnor JR, Drake BG. Effect of elevated CO_2 on coarse-root biomass in Florida scrub detected by ground-penetrating radar. *Ecology*. 2007;88(5):1328-1334. doi: 10.1890/06-0989
13. Hirano Y, Yamamoto R, Dannoura M, Aono K, Igarashi T, Ishii M, Yamase K, Makita N, Kanazawa Y. Detection frequency of *Pinus thunbergii* roots by ground-penetrating radar is related to root biomass. *Plant and Soil*. 2012;360:363-373. doi: 10.1007/s11104-012-1252-1

14. Barton CVM, Montagu KD. Detection of tree roots and determination of root diameters by ground penetrating radar under optimal conditions. *Tree Physiology*. 2004;24(12):1323-1331. doi: 10.1093/treephys/24.12.1323
15. Hirano Y, Dannoura M, Aono K, Igarashi T, Ishii M, Yamase K, Makita N, Kanazawa Y. Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar. *Plant and Soil*. 2009;319:15-24. doi: 10.1007/s11104-008-9845-4
16. Fridrikh G, Noymann D, Fogl' M. Fiziologiya plodovykh rasteniy [Physiology of fruit plants]. Moscow: Kolos Publ.; 1983. 416 p. In Russian
17. Shkura VN, Obumakhov DL, Luneva EN. Geometriya kornevykh sistem yabloni [The geometry of the root systems of the apple tree]. Novocherkassk: Lik Publ.; 2013. 124 p. In Russian
18. Ground penetrating radar theory and applications. Jol HM, editor. Amsterdam: Elsevier Publ.; 2009. 544 p.
19. Vladov ML, Sudakova MS. Georadiolokatsiya: ot fizicheskikh osnov do perspektivnykh napravleniy. Uchebnoe posobie [Ground Penetrating Radar: From Theory to future applications]. Moscow: GEOS Publ.; 2017. 240 p. In Russian
20. Annan AP. Ground penetrating radar principles, procedures and applications. Mississauga: Sensors&Software; 2003. 278 p.
21. Torgovnikov GI. Dielectric properties of wood and wood-based materials. Berlin: Springer Publ.; 1993. 196 p.
22. Guo L, Chen J, Cui XH, Fan BH, Lin H. Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: A review. *Plant and Soil*. 2013;362:1-23. doi: 10.1007/s11104-012-1455-5
23. Guo L, Lin H, Fan B, Cui X, Chen J. Forward simulation of root's ground penetrating radar signal: Simulator development and validation. *Plant and Soil*. 2013;372:487-505. doi: 10.1007/s11104-013-1751-8
24. Yeung SW, Yan WM, Hau CHB. Performance of ground penetrating radar in root detection and its application in root diameter estimation under controlled conditions. *Science China Earth Sciences*. 2016;59:145-155. doi: 10.1007/s11430-015-5156-9
25. Cui X, Chen J, Shen JS, Cao X, Chen XH, Zhu XL. Modeling tree root diameter and biomass by ground penetrating radar. *Science China Earth Sciences*. 2011;54:711-719. doi: 10.1007/s11430-010-4103-z
26. Guo L, Lin H, Fan B, Cui X, Chen J. Impact of root water content on root biomass estimation using ground penetrating radar: Evidence from forward simulations and field controlled experiments. *Plant and Soil*. 2013;371:503-520. doi: 10.1007/s11104-013-1710-4
27. Tanikawa T, Hirano Y, Dannoura M, Yamase K, Aono K, Ishii M, Igarashi T, Ikeno H, Kanazawa Y. Root orientation can affect detection accuracy of ground-penetrating radar. *Plant and Soil*. 2013;373:317-327. doi: 10.1007/s11104-013-1798-6
28. Guo L, Wu Y, Chen J, Hirano Y, Tanikawa T, Li W, Cui X. Calibrating the impact of root orientation on root quantification using ground-penetrating radar. *Plant and Soil*. 2015;395:289-305. doi: 10.1007/s11104-015-2563-9
29. Borden K, Isaac M, Thevathasan N, Gordon A, Thomas S. Estimating coarse root biomass with ground penetrating radar in a tree-based intercropping system. *Agroforesty Systems*. 2014;88:1-13. doi: 10.1007/s10457-014-9722-5
30. Wu Y, Guo L, Cui XH, Chen J, Cao X, Lin H. Ground penetrating radar-based automatic reconstruction of three dimensional coarse root system architecture. *Plant and Soil*. 2014;383:155-172. doi: 10.1007/s11104-014-2139-0
31. Cui X, Liu X, Cao X, Fan B, Zhang Z, Chen J, Chen X, Guo L. Pairing dual-frequency GPR in summer and winter enhances the detection and mapping of coarse roots in the semi-arid shrublandin China. *European J Soil Science*. 2019;71(2):1-16. doi: 10.1111/ejss.12858

32. Tanikawa T, Ikeno H, Dannoura M, Yamase K, Aono K, Hirano Y. Leaf litter thickness, but not plant species, can affect root detection by ground penetrating radar. *Plant and Soil*. 2016;408:271-283. doi: 10.1007/s11104-016-2931-0
33. Yamase K, Tanikawa T, Dannoura M, Ohashi M,·Todo C, Ikeno H, Aono K,·Hirano Y. Ground-penetrating radar estimates of tree root diameter and distribution under field conditions. *Trees*. 2018;32:1657-1668. doi: 10.1007/s00468-018-1741-9
34. Borden KA, Thomas SC, Isaac ME. Interspecific variation of tree root architecture in a temperate agroforestry system characterized using ground-penetrating radar. *Plant and Soil*. 2017;410:323-334. doi: 10.1007/s11104-016-3015-x
35. Demidov IN, Lukashov AD. Rel'ef i chetvertichnye otlozheniya botanicheskogo sada petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta kak osnova ego sovremennykh landshaftov [Relief and quaternary sediments of the Petrozavodsk State University Botanic Garden as the basis of its present landscapes]. *Hortus Botanicus*. 2001;1:25-33. In Russian
36. Krasil'nikov PV, Platonova EA. Pochvy zapovednoy territorii botanicheskogo sada PetrGU [Soils of the protected territory of the Petrozavodsk State University Botanic Garden]. *Hortus Botanicus*. 2001;1:34-41. In Russian
37. Cox KD, Scherm H, Serman N. Ground-penetrating radar to detect and quantify residual root fragments following peach orchard clearing. *HortTechnology*. 2005;15:600-607. doi: 10.21273/HORTTECH.15.3.0600
38. Raz-Yaseef N, Koteen L, Baldocchi DD. Coarse root distribution of a semi-arid oak savanna estimated with ground penetrating radar. *JGR Biogeosciences*. 2013;118(1):135-147. doi: 10.1029/2012jg002160
39. Kolesnikov VA. Kornevaya sistema plodovykh i yagodnykh rasteniy [The root system of fruit and berry plants]. Moscow: Kolos Publ.; 1974. 509 p. In Russian
40. Simms JE, McKay SK, McComas RW, Fischenich JC. *In situ* root volume estimation using ground penetrating radar. *J Environmental and Engineering Geophysics*. 2017;22(3):209-221. doi: 10.2113/JEEG22.3.209
41. Altdorff D, Botschek J, Honds M, van der Kruk J. *In situ* detection of tree root systems under heterogeneous anthropogenic soil conditions using ground penetrating radar. *J Infrastructure Systems*. 2019;25(3):1-8. doi: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000501
42. Dannoura M, Hirano Y, Igarashi T, Ishii M, Aono K, Yamase K, Kanazawa Y. Detection of *Cryptomeria japonica* roots with ground penetrating radar. *Plant Biosystems*. 2008;142(2):375-380. doi: 10.1080/11263500802150951

Received 17 March 2020; Revised 22 June 2020;
Accepted 25 June 2020; Published 25 September 2020

Author info:
Ryazantsev Pavel A, Cand. Sci. (Geol.-min.), Senior Researcher, Department of Multidisciplinary Scientific Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 11 Pushkinskay Str., Petrozavodsk 185910, Russian Federation.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-1944-9479
E-mail: chthonian@yandex.ru
Kabonen Aleksey V, Postgraduate Student, Department of Technology and Management of Forest Industry Complex, Institute of Forestry, Mining and Construction Sciences, Petrozavodsk State University, 33 Lenina Ave., Petrozavodsk 185910, Russian Federation.
E-mail: alexkabonen@mail.ru
Rodionov Aleksandr I, Junior Researcher, Laboratory of Geophysics, Institute of Geology Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 11 Pushkinskay Str., Petrozavodsk 185910, Russian Federation.
E-mail: fabian4695@gmail.com