

GROUND-PENETRATING RADAR AS A NON-DESTRUCTIVE METHOD FOR ROOT SYSTEM MAPPING: A CASE STUDY OF TWO SEQUOIA TREES IN BOROVETS

Zuzana Karakasheva-Tzankova, Christian Tzankov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: karakasheva11234@abv.bg

ABSTRACT. The paper presents the results of a ground-penetrating radar (GPR) survey carried out to assess the spatial distribution of the root systems of two sequoia trees in the Borovets area, Sofia Province, Bulgaria. The main objective of the study was to obtain non-destructive subsurface information that can support future construction planning and reduce the risk of damaging the trees. The survey was performed using a dense grid of mutually perpendicular GPR profiles with 0.5 m spacing. A total of 196 profile lines with an overall length of 3090 m were measured. The main data set was acquired with a *MALÁ X3M GPR* system equipped with an 800 MHz shielded antenna, while selected profiles were additionally surveyed with a *UtilityScan* system for verification. The data were processed using standard GPR procedures. The processed profiles and the generated three-dimensional GPR model reveal a number of linear anomalies and anomalous zones, interpreted as probable manifestations of the root system. The most distinct anomalies were observed near the tree trunks, with decreasing intensity and extent away from them. The results indicate that the main part of the detected root-related anomalies is developed within the upper 1.5 m of the subsurface. The study demonstrates the applicability of GPR as a fast, detailed, and non-destructive method for mapping shallow root systems in areas where direct excavation is undesirable or risky.

Key words: ground-penetrating radar (GPR), root system, sequoia, non-destructive survey, Borovets.

ГЕОРАДАРЪТ КАТО БЕЗРАЗРУШИТЕЛЕН МЕТОД ЗА КАРТИРАНЕ НА КОРЕНОВА СИСТЕМА: ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДВЕ СЕКВОИ В БОРОВЕЦ

Зузана Каракашева-Цанкова, Християн Цанков

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В статията са представени резултатите от георадарно изследване, проведено с цел оценка на пространственото разпространение на кореновата система на две секвои в района на Боровец, Софийска област. Основната задача на проучването е получаване на безразрушителна подповърхностна информация, която да подпомогне планирането на бъдещи строителни дейности и да намали риска от увреждане на дърветата. Измерванията са изпълнени по гъста мрежа от взаимно перпендикулярни георадарни профили с разстояние между тях 0,5 m. Общо са измерени 196 профилни линии с обща дължина 3090 m. Основният обем от данни е получен с георадарна система *MALÁ X3M* с екранирана 800 MHz антена, а част от профилите са допълнително дублирани със система *UtilityScan* за верификация на резултатите. Данните са обработени чрез стандартни процедури. В обработените радарграми и в съставения триизмерен георадарен модел са набелязани линейни аномалии и аномални зони, интерпретирани като вероятно проявление на кореновата система. Най-ясно изразените аномалии от тази категория се наблюдават в непосредствена близост до стволите, като интензитетът и обхватът им намаляват с отдалечаване от дърветата, а дълбочината им не надвишава 1,5 m. Изследването демонстрира приложимостта на георадара като бърз, детайлен и най-вече безразрушителен метод за картиране на плитките коренови системи в участъци, където директното им разкриване чрез изкопи е нежелателно или рисково.

Ключови думи: георадар, коренова система, секвоя, безразрушително изследване, Боровец.

Въведение

Кореновата система е основен елемент за устойчивостта, храненето и дълготрайното състояние на дърветата. В урбанизирана или частично застроена среда нейното пространствено разпространение често е слабо известно, но има пряко значение при планиране на изкопни, строителни и благоустройствени дейности. Механичното увреждане на главни корени може да доведе до влошаване на състоянието на дърветата, намаляване на тяхната устойчивост и в някои случаи до необходимост от премахването им. Поради това при обекти, в които ценни или значителни по размер дървета попадат в близост до бъдещи строителни дейности, е необходимо предварително изясняване на вероятното разпространение на кореновата система.

Традиционните подходи за изследване на корени са свързани с разкриване чрез изкопи, сондажи или други директни методи. Те дават надеждна информация в конкретни точки или участъци, но са трудоемки, ограничени по площ и могат сами по себе си да причинят увреждане на корените. Като алтернатива през последните десетилетия все по-често се прилагат безразрушителни методи, сред които георадарът заема важно място при изследване на плитките подповърхностни обекти (Daniels, 2004; Jol, 2009).

Методът регистрира отражения на високочестотни електромагнитни вълни от граници и обекти с различни електрични свойства. При подходящи условия дървесните корени могат да създават характерни отражения в радарграмите, най-често под формата на локални дифракционни хиперболи или линейно проследими аномалии.

Приложението на георадара за изследване на коренови системи е разглеждано в редица изследвания и обзорни публикации (Guo et al., 2013; Alani and Lantini, 2020). Hruška et al. (1999) демонстрират възможността за триизмерно картиране на коренови системи на големи дървета, а Čermák et al. (2000) комбинират георадарни и физиологични наблюдения при изследване на коренови системи на градски дървета. Stokes et al. (2002) разглеждат използването на георадар като безразрушителен метод за изследване на архитектурата на кореновата система. Bassuk et al. (2011) показват, че при подходящи почвени условия георадарът може надеждно да локализира корени под настилки. Guo et al. (2013) обобщават възможностите и ограниченията на метода при откриване и количествена оценка на по-едри корени, като подчертават ролята на почвените условия, влажността, честотата на антената и геометрията на корените спрямо профилните линии. Moore and Ryder (2015) изследват пространствената точност на

GPR при откриване на корени с различен диаметър и на различна дълбочина, а Nichols et al. (2017) разглеждат приложението на метода в градска среда и показват неговия потенциал за определяне на наличие, дълбочина и размер на корени под различни типове настилки.

Въпреки тези възможности, интерпретацията на георадарни данни за корени трябва да се извършва внимателно. Радарните отражения зависят не само от наличието на корени, но и от влажността на почвата, нейния гранулометричен състав, наличието на каменни късове, строителни отпадъци, подземни комуникации и други локални нехомогенности. Поради това в практиката резултатите обикновено се представят като зони с повишена вероятност за наличие на корени, а не като директно разкрита коренова система. Най-надеждни са интерпретациите, базирани на гъста мрежа от профили, съпоставка между различни направления на измерване и пространствено обобщаване на данните в двумерен или триизмерен модел.

Обект на изследване

Настоящата статия използва резултатите и първичната техническа информация от проведеното през 2023 г. георадарно проучване, обобщено в непубликуван технически доклад (Цанков, 2023).



Фиг. 1. Общ изглед от Google Earth към местоположението на двете секвоя в района на Апарта-хотел „Секвоя“, Боровец

Изследваният участък се намира в района на Апарта-хотел „Секвоя“, м. Боровецка седловина, Боровец, община Самоков (фиг. 1). Двете секвоя, предмет на настоящото изследване, са разположени на малка тревна площ между пътя от Боровец към Костенец и сградата на хотела. Непосредствената близост на дърветата до съществуващата сграда и до зона, в която се предвиждат бъдещи строителни дейности, определя необходимостта от предварителна оценка на пространственото разпространение на тяхната коренова система.

Предмет на георадарното изследване е плитката подповърхностна част на терена около двете дървета, където се очаква да е развита основната част от кореновата система. Целевата дълбочина на изследването е до около 2 m, като основен интерес представляват по-едрият корени, чието увреждане би могло да повлияе неблагоприятно върху устойчивостта и състоянието на дърветата. В

геофизичен смисъл търсените обекти могат да бъдат разглеждани като линейни или слабо извити подповърхностни тела с различен диаметър, разположени в слабоглинеста до пясъчлива почвена среда, на места примесена със скални късове и локални антропогенни материали.

При интерпретацията е отчетено, че георадарът не регистрира или разпознава директно корените на дърветата, а реагира на контрасти в електромагнитните свойства на средата. Поради това получените резултати са разглеждани като вероятни зони на разпространение на коренова система, определени въз основа на формата, положението, интензитета и пространствената повтораемост на регистрираните аномалии.

Методика на георадарните измервания

Преди провеждане на георадарните измервания е извършен оглед на терена, при който са оценени условията за работа, достъпността на площта около дърветата и възможностите за прокарване на профилни линии. С оглед повишаване на детайлността на проучването и проследяване на възможните направления на разпространение на кореновата система е избрана методика с две взаимно перпендикулярни профилни мрежи. Профилните линии са разположени през 0,5 m, което осигурява висока пространствена детайлност и възможност за последващо обединяване на данните в триизмерен георадарен модел.



Фиг. 2. Момент от георадарните измервания с MALÅ X3M в източния участък от площта

Площадката е предварително оразмерена на терена с помощта на рулетки и маркировъчни флагчета (фиг. 2). Това позволява поддържане на постоянна геометрия на профилите и по-добра ориентация на оператора при

движение по профилните линии. Измерванията са изпълнени чрез последователно, зигзагообразно обхождане на профилите. В участъците, където профилните линии пресичат стволите на дърветата, измерването е прекъсвано и продължавано от противоположната страна, като по този начин е запазена общата геометрия на мрежата.

Основният набор от данни е получен с георадарна система MALÅ X3M с екранирана антена с централна честота 800 MHz (фиг. 2). Изборът на високочестотна антена е обусловен от необходимостта от висока разделителна способност в плитката част на разреза, където се очаква да са развити основните корени. За допълнителна проверка на част от резултатите и оценка на поведението на сигнала в по-голяма дълбочина част от профилите са дублирани с георадарна система UtilityScan с антена 350 MHz.

Общо са измерени 196 георадарни профилни линии с обща дължина 3090 m. В основната площ около секвоите са прокарани 169 профила, от които 92 в едното направление и 77 в перпендикулярното направление. Допълнително са измерени 17 профила върху заравнена площадка североизточно от дърветата. Чрез тази схема е покрита площ от приблизително 0,95 дка, включваща непосредственото пространство около двете секвои и прилежащите участъци, в които е възможно развитие на по-едри корени (фиг. 3).



Фиг. 3. Схема на георадарните профили около двете секвои

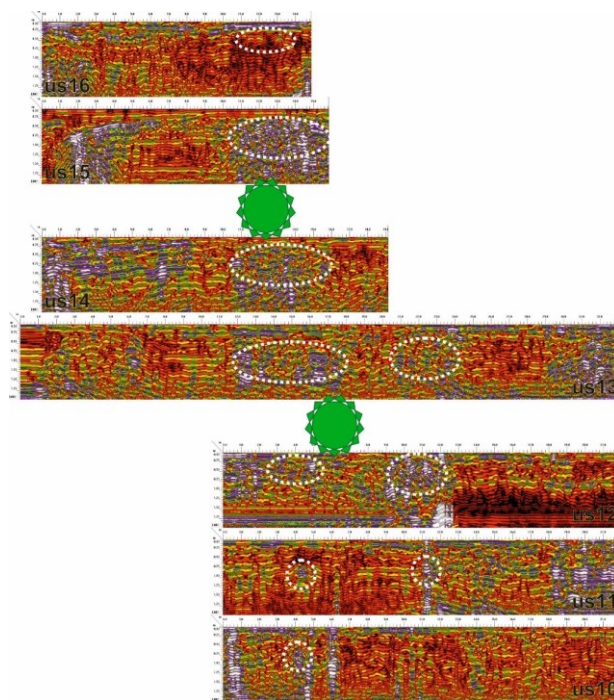
Първичните данни от системата MALÅ X3M са обработени с компютърната програма ReflexW, а данните от UtilityScan – с програмата RADAN 7. Приложена е стандартна последователност от обработки, включваща корекция на началния момент на записа, премахване на фоновия сигнал и допълнителна филтрация. Всички профили са преориентирани в единна координатна схема, така че резултатите да могат да бъдат съпоставяни по основните направления на измерване. При интерпретацията е използвана една обща средна скорост на разпространение на електромагнитните вълни $v_{cp} = 0,079$ m/ns, определена чрез комбинация от литературни данни и напасване на дифракционни хиперболи в радарграмите.

След обработката отделните радарграми са анализирани за наличие на локални аномалии, за тяхното проследяване по съседни профили и за обединяването им

в линейни аномалии и аномални зони, които по форма, дълбочина и пространствено положение могат да бъдат свързани с пресичане на корени от профилните линии (фиг. 4). Геометризираните данни от гъстата профилна мрежа са използвани за съставяне на триизмерен георадарен модел (фиг. 5), от който са генерирани хоризонтални срезове и обобщени изображения на амплитудното разпределение. Така интерпретацията не се основава само на отделни профили, а на пространственото поведение на аномалиите в рамките на цялата изследвана площ.

Резултати и интерпретация

Получените георадарни данни се характеризират с добро качество на сигнала в плитката част на разреза. Информативността на радарграмите е най-висока в интервала от повърхността до около 2 m дълбочина, което съответства на целевата дълбочина на изследването. В този интервал се наблюдават множество локални отражения, дифракционни форми и линейно проследими аномалии, които се различават по интензитет, размери и пространствено разположение.

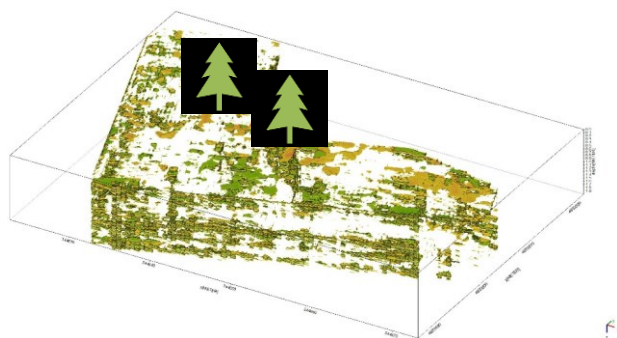


Фиг. 4. Примерни радарграми, получени с георадар UtilityScan с отбелязани аномалии, интерпретирани като вероятно свързани с кореновата система

В радарграмите, получени по профилите, дублирани със системата UtilityScan, най-ясно изразените аномалии се установяват в непосредствена близост до стволите на двете секвои. Те се проявяват като локални зони с по-силен и по-нееднороден радарен сигнал, както и като отделни дифракционни форми, характерни за пресичане на компактни или линейни подповърхностни обекти (фиг. 4). С отдалечаване от дърветата интензитетът и пространственият обхват на тези аномалии постепенно намаляват. Това поведение съответства на очакваното намаляване на броя и диаметъра на главните корени с увеличаване на разстоянието от стволите.

Анализът на отделните профили показва, че основната част от аномалиите, интерпретирани като вероятно свързани с кореновата система, се развива в дълбочинния интервал от повърхността до около 1,5 m. Под тази дълбочина се наблюдават отделни отражения, но те са слабо изразени, по-трудно проследими и не позволяват еднозначна връзка с кореновата система. Поради това интерпретацията е концентрирана основно върху плитката част на разреза, където разделителната способност, качеството на сигнала и пространствена повторимост на аномалиите са най-добри.

Данните от гъстата профилна мрежа, измерена със системата MALA X3M, са използвани за съставяне на триизмерен георадарен модел (фиг. 5). Той позволява пространствено проследяване на амплитудните аномалии не само по отделни профили, но и в план. От модела са генерирани хоризонтални срезове и обобщени амплитудни изображения, чрез които са отделени зоните с най-висока концентрация на линейни и локални аномалии. Този подход намалява риска от интерпретиране на единични случайни отражения като корени и позволява по-надеждно очертаване на участъците, в които аномалиите се проявяват последователно в повече от един профил.

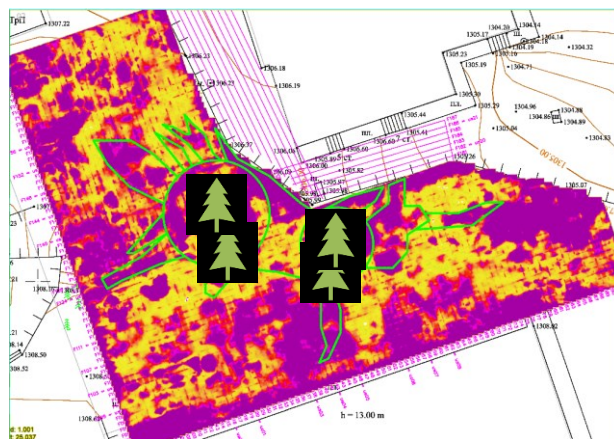


Фиг. 5. Триизмерен георадарен модел по данни от системата MALA X3M с визуализирани местата на максималните амплитуди на отраженията

Получените резултати показват, че вероятното разпространение на кореновата система е неравномерно и е най-добре изразено в зоните около двете дървета и между тях. Част от аномалиите се проследяват радиално от стволите, а други образуват по-широки зони с повишена амплитудна активност. Тази картина може да се свърже както с наличие на отделни по-едри корени, така и с участъци с по-гъсто развитие на коренова система. На заравнената площадка североизточно от секвите също се наблюдават локални аномалии, но част от тях вероятно са свързани с антропогенни обекти или нарушения в почвената среда, поради което не са интерпретирани еднозначно като корени.

Финалното очертаване на вероятните зони на кореново разпространение е извършено чрез съпоставка между отделните радарграми, хоризонталните срезове от триизмерния модел и обобщените амплитудни изображения. В резултат са отделени участъци, в които георадарните аномалии имат подходяща форма, дълбочина, ориентация и пространствена повторимост, за да бъдат интерпретирани като вероятно проявление на кореновата система. Така получената схема не трябва да се разглежда като директна карта на всички корени, а като

интерпретационен модел на зоните с най-висока вероятност за наличие на по-едри корени (фиг. 6).



Фиг. 6. Обобщена схема на вероятното разпространение на кореновата система на двете секви според интерпретираните георадарни данни наложена върху хоризонтален срез от триизмерния георадарен модел

Дискусия

Получените резултати потвърждават възможността георадарният метод да бъде използван като ефективен безразрушителен инструмент за изследване на плитките коренови системи. В конкретния случай основно предимство на метода е възможността за бързо покриване на сравнително голяма площ около дърветата, без необходимост от изкопи или други директни намеси в почвената среда. Това е особено важно при ценни дървета, при които самото разкриване на корените би могло да доведе до механично увреждане или промяна в условията на средата.

Най-съществен принос за интерпретацията има използването на гъста профилна мрежа в две взаимно перпендикулярни направления. При подобен тип задачи единичните радарни профили могат да бъдат недостатъчни, тъй като отделни локални отражения могат да бъдат причинени както от корени, така и от каменни късове, почвени нехомогенности или антропогенни включения. Съпоставянето на профили от различни направления и обединяването им в триизмерен модел позволява да се отделят пространствено издържани аномалии, които имат по-голяма вероятност да бъдат свързани с коренова система.

Интерпретираните аномални зони са най-добре изразени в близост до стволите на двете секви, като с отдалечаване от тях интензитетът и пространственият обхват на аномалиите намаляват. Тази закономерност съответства на очакваното поведение на кореновата система, при което по-едрите корени са развити в близост до дървото, а в периферните части размерът и гъстотата им постепенно намаляват. Основната част от аномалиите е установена в плитката зона на разреза, до около 1,5 m дълбочина, което е в съответствие с очаквания дълбочинен обхват на основната коренова система на секвите в конкретните условия.

Въпреки добрата информативност на данните, резултатите трябва да се разглеждат като интерпретационен модел, а не като директно изображение на всички корени. Георадарните отражения се определят от контраста в електромагнитните свойства между корените и вместващата среда, но подобни по форма аномалии могат да бъдат причинени и от други подповърхностни обекти. Допълнителни ограничения са свързани с влажността и нееднородността на почвата, наличието на скални късове, антропогенни нарушения и различната ориентация на корените спрямо профилните линии. Поради това най-надеждни са зоните, в които аномалиите се проявяват последователно в повече от един профил и се потвърждават в хоризонталните срезове или в обобщените изображения от триизмерния модел.

От практическа гледна точка георадарното изследване предоставя пространствена основа за предварително планиране на бъдещи строителни или изкопни дейности в близост до дърветата. Интерпретираните зони с повишена вероятност за наличие на по-едри корени могат да бъдат използвани за определяне на участъци с повишено внимание, както и за насочване на евентуални ограничени контролни разкрития. В този смисъл методът не заменя напълно експертната дендрологична или инженерна оценка, но предоставя важна информация за подповърхностната среда, която иначе би могла да бъде получена основно чрез директни, но разрушителни методи.

Заклучение

Проведеното георадарно изследване в района на Апартамент-хотел „Секвоя“, Боровец, показва, че методът е приложим за безразрушително картиране на вероятното разпространение на плитките коренови системи. Чрез гъста мрежа от взаимно перпендикулярни профили, използване на високочестотна 800 MHz антена и триизмерна обработка на данните са отделени линейни аномалии и аномални зони, интерпретирани като вероятно свързани с кореновата система на двете секвои.

Най-ясно изразените аномалии са установени в непосредствена близост до стволите, като основната част от тях се развива в плитката част на разреза, до около 1,5 m дълбочина. С отдалечаване от дърветата интензитетът и обхватът на аномалиите намаляват, което съответства на очакваното пространствено развитие на по-едри корени.

Получената интерпретационна схема може да бъде използвана при планиране на бъдещи строителни и изкопни дейности в района на дърветата. Тя очертава зоните, в които рискът от засягане на кореновата система е по-висок и където е необходима повишена предпазливост.

Резултатите показват, че георадарът е подходящ бърз и детайлен метод за предварителна оценка на коренови

системи в урбанизирана или частично застроена среда, особено когато директното разкриване чрез изкопи е нежелателно или рисково.

Литература

- Alani, A. M., & 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*, 41, 605–646. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09548-6>
- Bassuk, N., Grabosky, J., Mucciardi, A., & Raffel, G. (2011). *Ground-penetrating radar accurately locates tree roots in two soil media under pavement*. *Arboriculture & Urban Forestry*, 37(4), 160–166. <https://doi.org/10.48044/jauf.2011.021>
- Čermák, J., Hruška, J., Martinková, M., & Prax, A. (2000). *Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques*. *Plant and Soil*, 219, 103–116. <https://doi.org/10.1023/A:1004736310417>
- Daniels, D. J. (Ed.). (2004). *Ground penetrating radar (2nd ed.)*. The Institution of Electrical Engineers. <https://doi.org/10.1049/PBRA015E>
- Guo, L., Chen, J., Cui, X., Fan, B., & 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>
- Hruška, J., Čermák, J., & Šustek, 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>
- Jol, H. M. (Ed.). (2009). *Ground penetrating radar: Theory and applications*. Elsevier.
- Moore, G. M., & Ryder, C. M. (2015). *The use of ground-penetrating radar to locate tree roots*. *Arboriculture & Urban Forestry*, 41(5), 245–259. <https://doi.org/10.48044/jauf.2015.023>
- Nichols, P., McCallum, A. B., & Lucke, T. (2017). *Using ground penetrating radar to locate and categorise tree roots under urban pavements*. *Urban Forestry & Urban Greening*, 27, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.06.019>
- Stokes, A., Fourcaud, T., Hruška, J., Čermák, J., Nadyezhdina, N., Nadyezhdin, V., & Praus, L. (2002). *An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees in situ: I. Ground-penetrating radar*. *Journal of Arboriculture*, 28(1), 2–10. <https://doi.org/10.48044/jauf.2002.001>
- Цанков, X., Каракашева-Цанкова, З. (2023). *Георадарно изследване за установяване разпространението на кореновата система на две секвои в района на Апартамент-хотел „Секвоя“, м. Боровецка седловина, Боровец, общ. Самоков, Софийска област* [Непубликуван технически доклад]. Тера Скаут ЕООД, личен архив на авторите.