

TEST SKUTECZNOŚCI BADAŃ SYSTEMÓW KORZENIOWYCH SOSNY ZWYCZAJNEJ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) I SOSNY ŻÓŁTEJ (*PINUS PONDEROSA*) GEORADAREM WYPOSAŻONYM W ANTENĘ 750 MHz

Ewa E. Kurowska^{1✉}, Adrian Kasztelan², Andrzej Czerniak³

Katedra Inżynierii Leśnej, Wydział Leśny i Technologii Drewna, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
ul. Wojska Polskiego 71C, 60-625 Poznań

ABSTRAKT

Wstęp. Znajomość masy korzeni i architektury systemów korzeniowych ma wielorakie znaczenie w praktyce leśnej, np. w procesie przygotowywania gleby pod nasadzenia, przy określaniu stabilności drzew przed planowanymi zabiegami chirurgicznymi, na etapie projektowania szlaków zrywkowych, w ocenie oddziaływania korzeni rozrastających się drzew na istniejącą infrastrukturę, w tym drogową, czy chociażby w procesie szacowania absorpcji CO₂, co obecnie jest istotne w warunkach zachodzących fluktuacji klimatycznych. Metoda georadarowa badania systemów korzeniowych jest nieinwazyjna i pozwala w krótkim czasie przeprowadzić pomiary, co jest ogromną zaletą w porównaniu z tradycyjnymi pracami odkrywcowymi, które są pracochłonne i destrukcyjne.

Cel i materiały. Wykorzystując georadar (GPR) typu Ground Explorer (GX) HDR 750 MHz oraz oprogramowanie 3D Vision, wykonano badania systemów korzeniowych dwóch obiektów: sosny zwyczajnej i sosny żółtej. Testy przeprowadzono, zakładając dwa poligony badawcze o zróżnicowanej gęstości sieci profilowań. W rezultacie uzyskano dwa barwne modele przestrzenne rozmieszczenia korzeni, które następnie analizowano na obrazach powstałych przez wykonanie poziomych cięć czasowych dla różnych głębokości.

Wnioski. Test wykazał możliwość prześledzenia, w jaki sposób systemy korzeniowe są rozbudowane na różnych głębokościach: jakie są maksymalne głębokości penetracji badanych systemów korzeniowych oraz jaki jest lateralny zasięg występowania systemu korzeniowego. System korzeni sosny zwyczajnej wrósł do głębokości ok. 0,8 m, a sosny żółtej okazał się sięgać nieco głębiej (maks. ok. 0,95 m). W przypadku sosny żółtej system rozwinął się najdalej w kierunku wschodnim (ok. 1,9 m, mierząc od osi pnia), a korzenie sosny zwyczajnej sięgały najdalej w kierunku zachodnim (2,7 m). Z uzyskanych modeli 3D oraz pochodnych obrazów cięć poziomych możliwe jest uzyskanie informacji jakościowej oraz w pewnym zakresie również ilościowej. Wykazano różnice w poziomie szczegółowości modeli w zależności od gęstości siatki akwizycji danych.

Słowa kluczowe: georadar (GPR), badania nieinwazyjne, system korzeniowy, sosna

WSTĘP

Technika georadarowa (GPR – *ground penetrating radar*) opiera się na procesach transmisji i odbioru oraz rejestracji fal elektromagnetycznych o wysokiej

częstotliwości (radarowych) w zakresie od 10 MHz nawet do 6 GHz (Solla i in., 2021). Procesy propagacji i odbijania fal emitowanych przez georadar zachodzą

✉ ewa.kurowska@up.poznan.pl, <https://orcid.org/0000-0002-8559-0374>

pod powierzchnią terenu, w ośrodku gruntowym, skalnym lub w obrębie materiału konstrukcyjnego badanej budowli. Zjawisko odbicia fali ma miejsce na granicach warstw badanego ośrodka oraz na obiektach w gruntach (np. korzenie drzew) i jest możliwe ze względu na różne właściwości dielektryczne materiałów budujących warstwy czy obiektów znajdujących się w tych warstwach. Odbicie następuje wówczas, gdy przemieszczająca się w ośrodku fala napotyka na powierzchnię graniczną pomiędzy elementami o różnych właściwościach dielektrycznych. Antena georadarowa wraz z towarzyszącym oprzyrządowaniem i oprogramowaniem, emitując fale radarowe penetrujące grunt w formie impulsów elektromagnetycznych, stanowi szerokopasmowy system radarowy, za pomocą którego można określać głębokość, położenie i rozmiar materii czy obiektów pod powierzchnią terenu na podstawie czasu i amplitudy odbitych fal (Hirano i in., 2012). W ostatnich latach georadar zyskał popularność także w leśnictwie (Ferrara i in., 2014). Systemy korzeniowe drzew odgrywają ogromną rolę w ekosystemach lądowych, mają podstawowe znaczenie dla wzrostu i egzystencji samego drzewa (Kasztelan, 2021). Niejednokrotnie także wpływają na stan infrastruktury w przestrzeni zurbanizowanej, w tym infrastruktury drogowej.

Najczęściej rozróżnia się dwa typy korzeni: palowy i wiązkowy. W rzeczywistości układ systemów korzeniowych jest determinowany przez wiele czynników zewnętrznych (rodzaj gleby, warunki wodne, bariery mechaniczne, więźbę sadzenia, oddziaływanie mechaniczne itp.). Nawet u drzew tego samego gatunku występują modyfikacje systemów korzeniowych i nie zawsze sprawdza się podział drzew na grupy z systemami: talerzowymi, palowymi czy sercowymi. Znajomość masy i rozkładu systemów korzeniowych jest bardzo przydatna. Korzenie magazynują CO₂, stąd wiedza o całkowitej masie substancji organicznej jest istotna w obliczaniu bilansu węgla. Obecnie, w warunkach anomalii klimatycznych, nawet typowe dla poszczególnych gatunków systemy korzeniowe ulegają deformacjom wynikającym ze zmieniających się stosunków wodnych w glebie. Wiedza o rozkładzie korzeni ma też znaczenie przy przeprowadzaniu zabiegów chirurgicznych na drzewach. W tym przypadku istotne jest określenie stabilności drzew, w szczególności drzew bardzo cennych, np. pomnikowych.

W gospodarce leśnej wiedza o rozkładzie korzeni jest istotna zarówno w procesie przygotowywania gleby pod nasadzenia, jak i w ocenie wpływu szlaków zrywkowych na drzewostany. Oddziaływanie ciężkich maszyn leśnych może bowiem zakłócać rozwój systemów korzeniowych, a tym samym witalność całych drzew. Pozostawiana na zrębach karpia to część drzewa obejmująca pniak i korzenie. Drewno pozyskiwane z karpia, czyli karpina (karpowina) może mieć też znaczący udział w wytwarzaniu energii z biomasy. Drewno podziemnej części karpiny jest bowiem bardzo kaloryczne. Znajomość rozkładu korzeni jest bardzo istotna także w inżynierii lądowej, zarówno na etapie projektowania nowych obiektów, jak i w ocenie oddziaływania korzeni rozrastających się drzew na istniejącą infrastrukturę podziemną: liniową i kubaturową. Dlatego w wielu sytuacjach zachodzi potrzeba rozpoznania przestrzennej architektury systemów korzeniowych w celach praktycznych. Metoda georadarowa, w odróżnieniu od tradycyjnych, pracochłonnych i destrukcyjnych prac odkrywkowych, jest nieinwazyjna i znajduje coraz większe zastosowanie praktyczne i naukowe. W literaturze podkreśla się znaczenie badań georadarowych w wykrywaniu korzeni, ilościowym oznaczaniu oraz szacowaniu biomasy i zdrowotności (Borden i in., 2014; Butnor i in., 2001; Hirano i in., 2012; Simms i in., 2017). W Polsce badania georadarowe (GPR) systemów korzeniowych jodły (*Abies alba*) oraz świerka (*Picea abies*) były wykonywane np. w Karpatach (Giża-Potępa i in., 2017; 2019; Potępa i in., 2018); innym przykładem są badania korzeni drzewa rodzaju *Platanus* pod liniami torowisk tramwajowych (Szykiewicz i in., 2021). Korzyści z wykorzystywania tej metody w badaniach korzeni drzew podsumowali Hruska i in. (1999), stwierdzając, że ta metoda umożliwia skanowanie systemów korzeniowych dużych drzew w warunkach terenowych w krótkim czasie, nie narusza struktury gleby ani nie uszkadza badanych drzew, nie szkodzi w żaden sposób środowisku, pozwala na wielokrotne wykonywanie pomiarów, co umożliwia długoterminowe monitorowanie rozwoju systemu korzeniowego, pozwala na obserwację rozprzestrzenienia korzeni nawet pod dnem strumieni, jezior, w skałach, pod drogami i budynkami, pozwala na analizę korzeni zarówno pojedynczego drzewa, jak i całego drzewostanu; dokładność badań jest wystarczająca do wykrywania korzeni

o średnicach od mniej niż 1 cm do powyżej 3 cm. Zakres możliwości wykorzystania georadaru zależy od parametrów sprzętu, zwłaszcza częstotliwości anteny.

CEL I ZAKRES BADAŃ

Głównym celem badań było przetestowanie przydatności opcji post-processingu danych radarowych i trójwymiarowego obrazowania dostępnych w oprogramowaniu towarzyszącym georadarowi 750 MHz (MALA 3D Vision). Ekranowane anteny 750 MHz umożliwiają penetrację gruntu do głębokości 4,5 m pod powierzchnią terenu. Wybrano dwa obiekty do sondowania i wizualizacji systemu korzeniowego: sosnę zwyczajną (*Pinus sylvestris* L.) wieku ok. 50 lat i pierśnicy 0,3 m oraz sosnę żółtą (*Pinus ponderosa*) wieku ok. 80 lat i pierśnicy 0,5 m (rys. 1a). Oba obiekty badawcze rosną w Ogrodzie Dendrologicznym Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Sosnę zwyczajną wybrano jako główny gatunek lasotwórczy w Wielkopolsce. Pomimo znacznego zakresu tolerancji tego gatunku na warunki środowiska, w szczególności klimatyczne zmiany wilgotnościowe i temperaturowe, coraz częściej odnotowuje się zamieranie pojedynczych drzew, a nawet fragmentów drzewostanów sosnowych (szczególnie o wystawie południowej). Coraz częściej obserwuje się też zmiany morfologiczne systemów korzeniowych sosen w aspekcie zmian klimatycznych. Dla porównania przeanalizowano także układ korzeni gatunku obcego, dekoracyjnego, czyli sosny żółtej. Założono, że oba obiekty badawcze będą rosły w podobnych warunkach środowiskowych, a więc na glebach bielicowych Ogrodu Dendrologicznego, gdzie głębokość zwierciadła wód gruntowych w przypadku lokalizacji sosny żółtej wynosiła ok. 2,5 m, natomiast w rejonie sosny zwyczajnej, położonym wyżej, ok. 4,5 m.

METODYKA PRZEPROWADZENIA TESTU

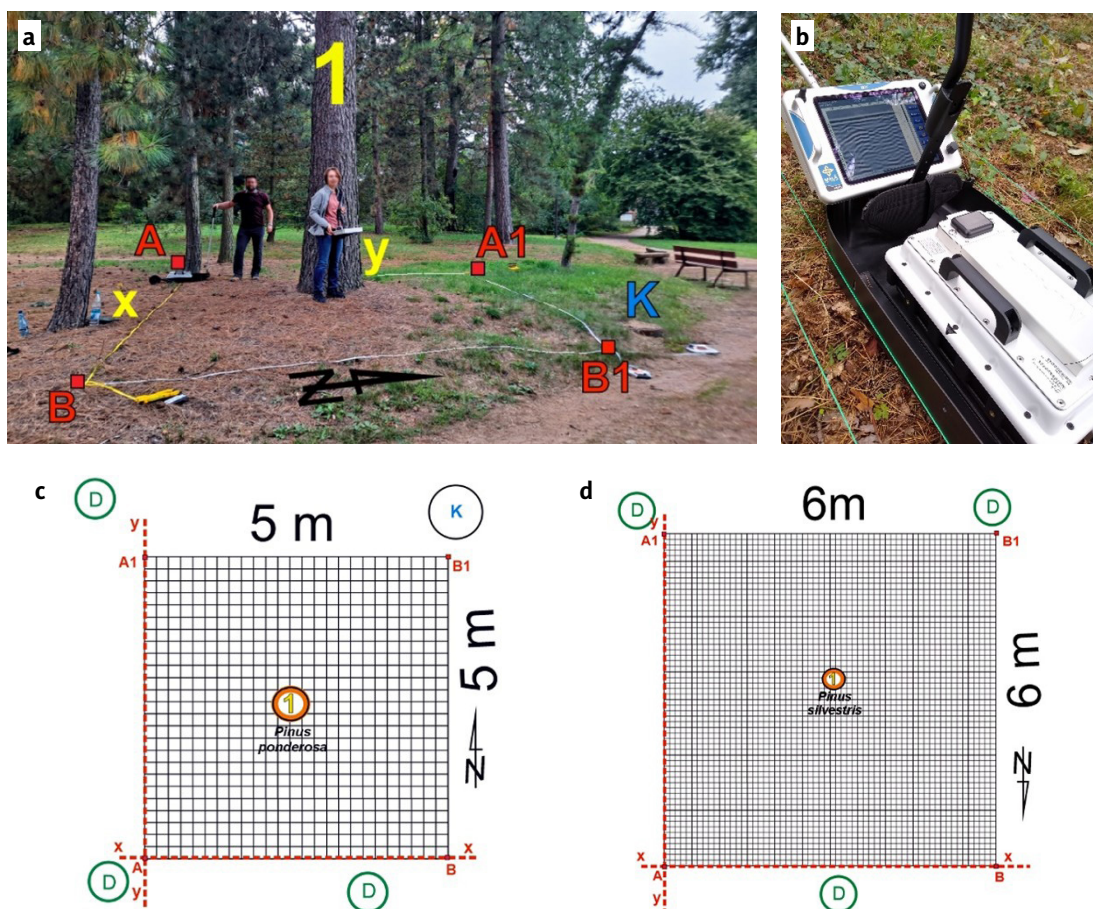
W pracy zaprezentowano efekty metody wykorzystanej do mapowania systemu korzeniowego anteną ekranowaną o częstotliwości centralnej 750 MHz typu Ground Explorer (GX) HDR firmy MALA (rys. 1b). Użyty w badaniu sprzęt to najnowszej generacji urządzenie zakupione w roku 2020 przez Wydział Leśny i Technologii Drewna Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu.

Zgodnie z metodyką opisaną w innych pracach o podobnej tematyce (np. Borden i in., 2014; Giża-Potępa i in., 2017; 2019; Hirano i in., 2012; Lorenzo i in., 2010), w obu przypadkach wokół drzewa założono pole testowe, tzn. wyznaczono punkty i linie bazowe wytyczające obszary o wymiarach 5×5 m w przypadku sosny żółtej oraz 6×6 m w przypadku sosny zwyczajnej; drzewo będące obiektem testu znajdowało się mniej więcej w centrum poligonu (rys. 1a, 1c, 1d). Linie bazowe zorientowano względem kierunków świata: linia Y była usytuowana na kierunku północ-południe, a linia X na kierunku zachód-wschód. Od linii bazowych wytyczono linie pośrednie, stanowiące linie siatki profilowań, z interwałem co 0,20 m w przypadku sosny żółtej oraz 0,10 m w przypadku sosny zwyczajnej. Zgodnie z siatkami linii profilowań wykonano 52 sondowania dla sosny żółtej, w systemie 26×26 przebiegających prostopadłe do siebie sondowań (rys. 1c) i 122 sondowania (61×61) dla sosny zwyczajnej (rys. 1d). Akwizycję danych georadarowych przeprowadzono z interwałem punktowym równym 0,02 m (impuls wysyłany do gruntu). Program 3D Vision umożliwia szybkie i sprawne przetworzenie tak pozyskanych danych, w efekcie czego uzyskano wyniki obrazowania 3D systemów korzeniowych wybranych drzew. W ramach analizy uzyskanego modelu 3D wygenerowano poziome cięcia (ang. *slices*); program umożliwia prześledzenie obrazów sytuacji w głębszej w interwałach co 0,5 cm głębokości (od powierzchni terenu do zadanej głębokości badawczej). Możliwe jest także wygenerowanie obrazu zbiorczego dla danego interwału głębokości, co również wykorzystano w tej pracy.

REZULTAT TESTU I Dyskusja

Uzyskany model rozprzestrzenienia systemów korzeniowych badanych drzew jest prezentowany w systemie barw (anomali GPR), w którym tło (grunt, przez który przebiegają fale radarowe) jest w odcieniach zieleni, natomiast obiekty zakłócające przebieg fali są rejestrowane jako elementy anomalne, utożsamiane z systemami korzeniowymi, mają kolory ciepłe (rys. 2): żółty, pomarańczowy, czerwony.

Na uzyskanych obrazach poziomych cięć czasowych, na pewnych głębokościach obserwowano charakterystyczny, koncentryczny rozkład anomali,

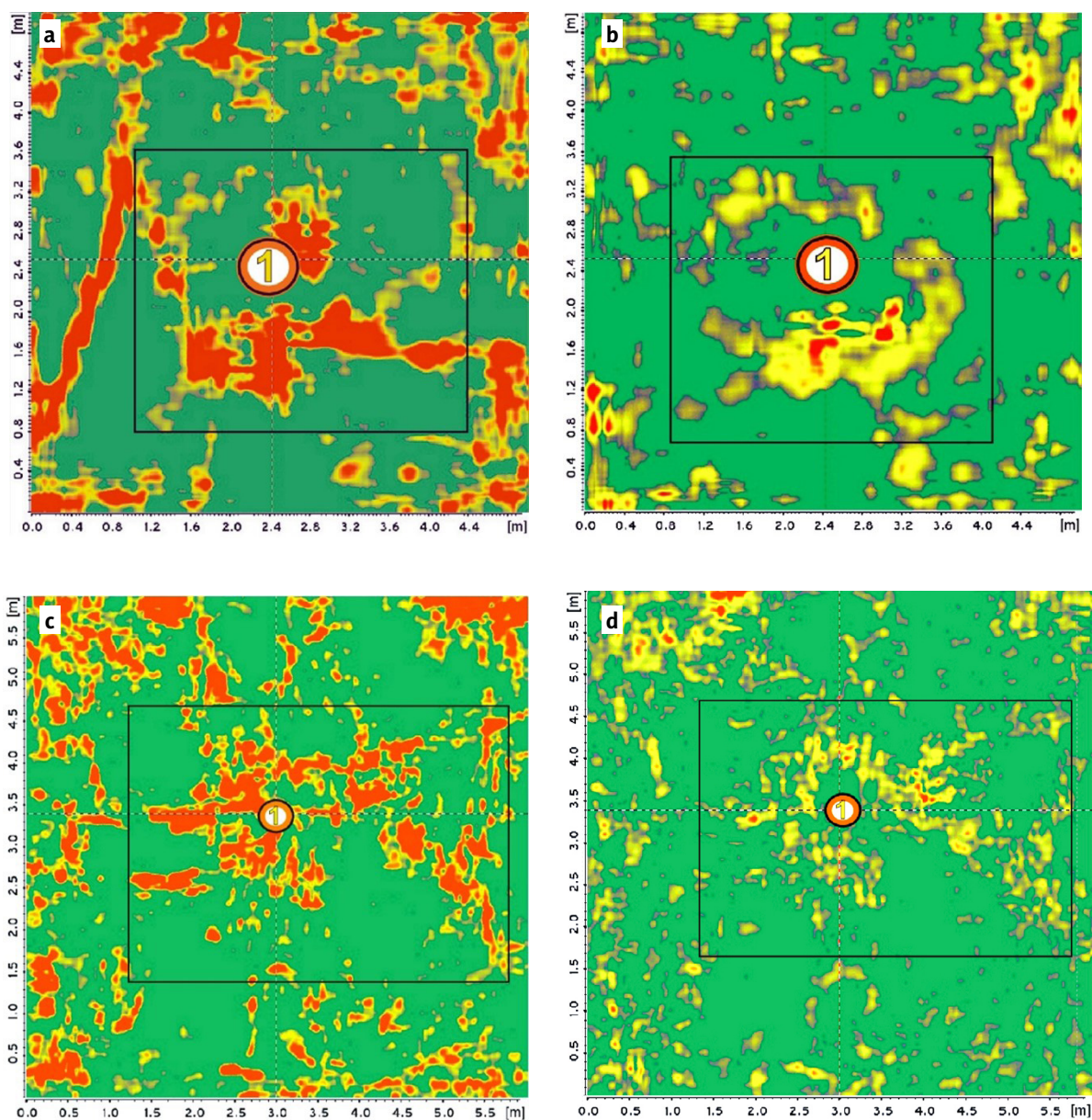


Rys. 1. (a) Pole testowe do badań sosny żółtej. (b) System Ground Explorer (GX) HDR z antenami ekranowanymi 750 MHz. (c) Siatka profilowań georadarowych (przekrojów GPR) dla sosny żółtej. (d) Siatka profilowań georadarowych dla sosny zwyczajnej. Cyfra 1 – drzewo, którego system korzeniowy badano; A, A1, B, B1 – punkty kontrolne poligonu badawczego; x, y – linie bazowe (do ich zaznaczenia wykorzystano taśmy miernicze); K – studzienka; D – inne drzewo lub pozostałość po wycięciu

Fig. 1. (a) The yellow pine test site. (b) the Ground Explorer (GX) HDR system with a 750 MHz antenna. (c) the GPR profiles grid designed for yellow pine. (d) the GPR profiles grid designed for Scots pine. Number 1 – the tree, which root system was examined; A, A1, B, B1 – test site checkpoints; x, y – baselines (measuring tapes were used); K – drillhole; D – another tree or felling residue

obrazujący geometrię systemu korzeniowego wokół pnia; obraz taki zanikał na pewnej głębokości. Dokładnie analizując obrazy z poszczególnych poziomów, począwszy od poziomu terenu do głębokości 1,5 m, prześledzono, w jaki sposób systemy korzeniowe są rozbudowane na poszczególnych głębokościach. Stwierdzono także maksymalne głębokości penetracji badanych systemów korzeniowych. System korzeni sosny żółtej okazał się sięgać nieco głębiej

(maks. ok. 0,95 m) niż sosny zwyczajnej (maks. ok. 0,8 m), przy czym maksymalne zagęszczenie biomasy w systemie korzeniowym obserwuje się znacznie płycej: ok. 0,07 m u sosny żółtej i ok. 0,6–0,65 m u sosny zwyczajnej (rys. 2). Podane maksymalne głębokości penetracji dotyczą pojedynczych, najdłuższych korzeni. Uzyskany obraz geometrii systemów korzeniowych powstał głównie poprzez wyodrębnienie korzeni najgrubszych (szkieletowych), czyli takich, które



Rys. 2. Wybrane obrazy rozprzestrzenienia systemów korzeniowych w obrębie założonych poligonów testowych (poziome cięcia czasowe): **a** – sumaryczny obraz rozprzestrzenienia masy korzeniowej sosny żółtej w interwale głębokości 0–0,5 m, **b** – obraz rozprzestrzenienia korzeni sosny żółtej na głębokości 0,07 m, **c** – sumaryczny obraz rozprzestrzenienia masy korzeniowej sosny zwyczajnej w interwale głębokości 0,4–0,8 m, **d** – obraz rozprzestrzenienia systemu korzeni sosny zwyczajnej na głębokości 0,62 m. Ciemne ramki na obrazach wyznaczają prawdopodobny zasięg systemów korzeniowych na danej głębokości lub w całym interwale.

Fig. 2. Selected images of the root system distribution within established test sites (horizontal slices): **a** – image of the yellow pine root distribution at the depth interval from 0 to 0.5 m, **b** – image presenting the distribution of yellow pine roots at a depth of 0.07 m, **c** – image of the Scots pine root distribution at the depth interval from 0.4 to 0.8 m, **d** – image presenting the distribution of Scots pine roots at a depth of 0.62 m. Dark frames in the images indicate the probable range of root systems at a given depth or within at given interval

georadar jest w stanie zarejestrować, wysyłając impulsy co 2 cm na linii profilowania. W przypadku korzeni drobniejszych są one uwzględnione także w budowie modelu, jednak głównie w strefach największego zagęszczenia masy korzeniowej; im większe zagęszczenie, tym większe prawdopodobieństwo, że emitowana z urządzenia fala trafi w drobniejsze objekty i zarejestruje ich obecność.

Dla obu analizowanych przypadków sosny żółtej i sosny zwyczajnej oznaczono lateralny zasięg występowania systemu korzeniowego w odniesieniu do pnia drzewa. Wytyczenie zasięgu strefy korzeniowej jest bardziej oczywiste w strefie znajdującej się najbliższej pnia oraz tam, gdzie biomasa korzeni jest najbardziej gęsta, przykłady takiego usytuowania systemów korzeniowych widać na obrazach georadarowych na rysunku 2. Obserwuje się wówczas wyraźne anomalie wokół pnia. Im jednak promień obserwacji jest dłuższy, im dalej od pnia, tym trudniej zinterpretować widoczne anomalie. Mogą one bowiem zarówno odzwierciedlać odgałęzienia pojedynczych grubych korzeni lub stref zagęszczenia drobniejszych korzeni badanego drzewa, jak i być fragmentami systemów korzeniowych innych drzew znajdujących się w niedalekiej odległości lub nawet systemów korzeniowych drzew, które rosły w pobliżu, ale zostały wycięte. Na polu badawczym sosny żółtej, w pobliżu badanego obiektu występowały także inne sosny (rys. 1a i 1c), natomiast w miejscu testowym sosny zwyczajnej znajdowały się dosyć rozległe systemy korzeni pozostałe po ściętych drzewach (rys. 1d). Dlatego na prezentowanych obrazach – poza zagęszczeniem korzeni wokół pnia i w bliskiej ich odległości – można zaobserwować żółtoczerwone anomalie także w innych częściach obrazów, a zwłaszcza w strefach brzeżnych i narożnych, w pobliżu których są zlokalizowane pnie innych drzew. Miejsca ich usytuowania w stosunku do poligonów badawczych zaznaczono na rysunku 1c i 1d. Co więcej, możliwe, że na polu badawczym sosny żółtej radar zarejestrował fragment umieszczonej w gruncie infrastruktury, np. rury (rys. 2a, po lewej stronie obrazu), o czym może świadczyć natężenie zaznaczającej się tam anomalii i jej przebieg zbliżony do prostoliniowego. Dodatkowo, w badaniach georadarowych systemów korzeniowych elementem zakłócającym obraz mogą być większe fragmenty skał obecne pod powierzchnią terenu. W warunkach

geologicznych obszaru testowego istnieje prawdopodobieństwo występowania gładów narzutowych w piaskach i glinach podłoża.

W opisywanym teście wyinterpretowane z modelu zasięgi występowania korzeni są uwidocznione na rysunku 2, zakreślone ciemnym prostokątem. W przypadku sosny żółtej system rozwinął się najdalej w kierunku wschodnim (ok. 1,9 m, mierząc od osi pnia), w kierunku zachodnim – na odległość ok. 1,35 m, w kierunku północy – 1,2 m, a na południe – 1,6 m. Dla sosny zwyczajnej zmierzone maksymalne zasięgi systemów korzeniowych wynosiły odpowiednio: ok. 1,75 m w kierunku wschodnim, 2,7 m na zachód, 1,9 m ku północy i ok. 1,35 w kierunku południowym.

PODSUMOWANIE

Podczas opisanych badań testowych, w opcjach parametrów anteny georadaru ustawiono dwucentymetrowy (0,02 m) interwał wysyłania impulsu fali elektromagnetycznej do gruntu, co pozwoliło na wykrycie korzeni o średnicy powyżej 2 cm, natomiast wykrycie korzeni drobniejszych było uzależnione od trafienia fali danego impulsu w obiekt drobniejszy. Strefowe zagęszczenia drobniejszych korzeni z pewnością sprzyjały zarejestrowaniu anomalii, choć nie dawały dokładnej informacji o średnicy obiektów. W badaniach georadarowych oczekiwana dokładność wykrywanych anomalii zależy od założonego celu projektu. W opcjach sprzętowych anteny wykorzystanej do niniejszego testu można regulować interwał odległościowy generowania impulsu radarowego w zakresie od 0,002 m do 1,00 m: im drobniejszy obiekt, który chcemy znaleźć pod powierzchnią terenu, tym mniejszy interwał impulsu i tym gęstsza powinna być siatka linii profilowych. Jednak im bardziej szczegółowe dane generuje sprzęt, tym większa musi być przestrzeń cyfrowa do zapisywania tych danych (odpowiednia pojemność dysku kontrolera georadaru), a ta jest czasami ograniczona. Ważne, by właściwie rozważyć poziom szczegółowości modelu, który chce się uzyskać. W efekcie przeprowadzonego testu można zaobserwować pewne zróżnicowanie szczegółowości modelu (cecha jakościowa) wynikające z różnicy zagęszczenia linii profilowych. W przypadku sosny żółtej uzyskany obraz anomalii utożsamianych z masą korzeniową jest nieco bardziej zgeneralizowany (linie

profilowe wytyczone co 0,2 m), natomiast w przypadku sosny zwyczajnej obraz anomalii wydaje się bardziej precyzyjny, charakteryzujący się większą liczbą drobniejszych poligonów w kolorach żółtoczerwonych (linie profilowe wytyczone co 0,1 m). W przeprowadzonym eksperymencie uzyskano wiarygodną informację jakościową o geometrii systemu korzeniowego; wygenerowany model pozwolił także na otrzymanie pewnych informacji ilościowych, jak głębokość penetracji korzeni czy zasięgi ich rozprzestrzenienia. Do dalszych badań pozostaje sprawdzenie możliwości uzyskania wymiarów/średnic korzeni rozpoznanych georadarem z anteną 750 MHz. W literaturze przedmiotu przedstawiane są przykłady stosowania anten o różnej częstotliwości do uzyskiwania właśnie tak szczegółowych obrazów, choć autorzy postulują również stosowanie innych, dodatkowych technik dla uwiarygodnienia generowanych modeli, np. tomografii elektrooporowej (Zenone, 2008) lub przetwarzania uzyskanych danych za pomocą wysoko zaawansowanych technik cyfrowych, algorytmów i oprogramowania (Arosio i in., 2020).

Reasumując, przeprowadzony test potwierdza hipotezę, że z powodzeniem można analizować systemy korzeniowe drzew nieinwazyjnymi metodami georadarowymi. To o tyle istotne, że w pewnych sytuacjach odsłanianie systemów korzeniowych jest niemożliwe ze względów technicznych (np. pod nawierzchnią drogową, linią tramwajową lub kolejową) i przyrodniczych (np. w przypadku drzew pomnikowych).

Istotną zaletą metody georadarowej (GPR) jest też możliwość stosunkowo szybkiej oceny istniejącego lub potencjalnego konfliktu infrastruktury podziemnej z systemami korzeniowymi drzew.

PIŚMIENNICTWO

- Arosio, D., Hojat, A., Munda, S., Zanzi, L. (2020). Non-destructive root mapping: Exploring the potential of GPR. Conference Proceedings. 3rd Asia Pacific Meeting on Near Surface Geoscience and Engineering, Nov 2020, 1–5.
- 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. *Agrofor. Syst.*, 88(4), 657–669. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-014-9722-5>
- 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 Physiol.*, 21(17), 1269–1278. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/21.17.1269>
- Ferrara, C., Barone, P. M., Salvati, L., Pettinelli, E. (2014). Ground penetrating radar as remote sensing technique to investigate the root system architecture. *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 12(3), 695–702. http://dx.doi.org/10.15666/aer/1203_695702
- Giża-Potępa, B., Szyrkiewicz, A., Udrysz, M. (2017). GPR survey for fir (*Abies alba*) and spruce (*Picea abies*) root systems in different location in Western Carpathians Mts. (Beskidy Mts., Poland). EGU2017-1944, X4.209 Poster. Vienna, Austria.
- Giża-Potępa, B., Szyrkiewicz, A., Udrysz, M. (2019). GPR survey for fir (*Abies alba*) and spruce (*Picea abies*) root systems at different locations within the Western Carpathian Mts. (Poland). In: M. Guy, A. Szyrkiewicz (Eds.), 2019 – Conference Materials of the 1st International Conference on Ground Penetrating Radar Application for Solving Engineering Problems EuroGPR2019 Poland Wrocław, November 21–22, 2019. Posters: p. 83. Wrocław: EuroGPR Association & University of Wrocław.
- Hirano, Y., Yamamoto, R., Dannoura, M., Aono, K., Igarashi, T., Ishii, M., Kanazawa, Y. (2012). Detection frequency of *Pinus thunbergii* roots by ground-penetrating radar is related to root biomass. *Plant Soil*, 360(1–2), 363–373. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-012-1252-1>
- Hruska, J., Cermak, J., Sustek, S. (1999). Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Tree Physiol.*, 19(2), 125–130. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/19.2.125>
- Kasztelan, A. (2021). Mapowanie systemu korzeniowego sosny zwyczajnej za pomocą metody GPR. W: D. Tomaszewski, A.M. Jagodziński (red.), Materiały konferencyjne: Drzewa i lasy w zmieniającym się środowisku – Konferencja naukowa. Kórnik–Poznań, 11–13 października 2021 (s. 115–116). Poznań: Bogucki Wyd. Nauk.
- Lorenzo, H., Pérez-Gracia, V., Novo, A., Armesto, J. (2010). Forestry applications of ground-penetrating radar. *For. Syst.* 19(1), 5–17.
- Potępa, B., Szyrkiewicz, A., Udrysz-Kraweć, M. (2018). GPR survey for fir (*Abies alba*) and spruce (*Picea abies*) root systems in different locations in the Western Carpathians Mts. (Poland). *J. Geol. Res. Eng.*, 6, 5, 194–209.
- Simms, J. E., McKay, S. K., McComas, R. W., Fischenich, J. C. (2017). In situ root volume estimation using ground

- penetrating radar. J. Environ. Eng. Geophys., 22(3), 209–221. <http://dx.doi.org/10.2113/jeeeg22.3.209>
- Solla, M., Pérez-Gracia, V., Fontul, S. (2021). A review of GPR application on transport infrastructures: troubleshooting and best practices. Remote Sens., 13(4), 672. <http://dx.doi.org/10.3390/rs13040672>
- Szynkiewicz, A., Szczurek, P., Udyrysz-Kraweć, M. (2021). Badania testowe możliwości zastosowania metody GPR do wykrywania korzeni drzew pod torowiskami tramwajowymi. Studium naukowo-badawcze (dokumentacja, niepublikowane. Wrocław: KART-GEO.
- Zenone, T., Morelli, G., Teobaldelli, M., Fischanger, F., Matteucci, M., Sordini, M., Seufert, G. (2008). Preliminary use of ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography to study tree roots in pine forests and poplar plantations. Funct. Plant Biol., 35(10), 1047. <http://dx.doi.org/10.1071/fp08062>

TESTING THE EFFECTIVENESS OF DETECTION OF SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) AND YELLOW PINE (*PINUS PONDEROSA*) ROOT SYSTEMS USING GPR EQUIPPED WITH A 750 MHZ ANTENNA

ABSTRACT

Introduction. Knowledge on the volume and architecture of tree root systems is important for many fields of forestry practice, e.g. the process of soil preparation for planting, determining the stability of trees before planned surgical procedures, at the stage of designing logging routes, assessing the impact of growing tree roots on the existing infrastructure, including roads, or even in the process of estimating CO₂ absorption, which is currently important in view of climatic fluctuations. The GPR method of examining root systems is non-invasive and facilitates quick measurements, which is a huge advantage compared to traditional opencast works, which are labor-intensive and destructive.

Aim and materials. Using the MALA Ground Explorer (GX) HDR GPR system with a 750 MHz antenna and the 3D Vision software, the root systems of Scots pine and yellow pine were examined. The tests were carried out on two test sites differing in the profiling grid density. As a result, the two color spatial models of root distribution and extent were obtained, which were then analyzed on 2D images created by making horizontal cuts at different depths (slices). The tests were performed on the tree root systems of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus ponderosa*.

Conclusions. The test showed the possibility of observing how the root systems are developed at different depths: the maximum penetration depth of the tested root systems and their lateral range. Qualitative and also quantitative to some extent information may be obtained from the 3D models (horizontal slices). Finally, differences in model accuracy were demonstrated, which was related to the density of data acquisition grids. The root system depth of *Pinus ponderosa* was 0.95 m, while that of *Pinus sylvestris* was 0.8 m. The root system of the *Pinus ponderosa* tree developed farthest to the east to approx. 1.9 m (measured from the trunk axis), to the west to a distance of approx. 1.35 m, to the north – 1.2 m and to the south up to 1.6 m. For the *Pinus sylvestris* tree the maximum root ranges were approx. 1.75 m to the east and 2.7 m to the west, max. 1.9 m to the north, and about 1.35 m to the south.

Keywords: GPR, non-invasive research, tree root system, *Pinus ponderosa*, *Pinus sylvestris* L.