

**Anna LEJZEROWICZ**

Politechnika Warszawska  
Wydział Inżynierii Łądowej  
e-mail: a.lejzerowicz@il.pw.edu.pl

**Sebastian KOWALCZYK**

Uniwersytet Warszawski  
Wydział Geologii  
e-mail: s.kowalczyk@uw.edu.pl

## **UŻYTECZNOŚĆ BADAŃ GPR DO IDENTYFIKACJI CECH WEWNĘTRZNYCH OSADÓW RZEKI WISŁY NA OBSZARACH NATURA 2000**

### **Usefulness of GPR surveys for identification of internal features of Vistula River deposits in Natura 2000 areas**

**Zarys treści:** W artykule przedstawiono rezultaty pomiarów georadarowych – GPR (ang. *Ground Penetrating Radar*) wykonanych na obszarach Natura 2000 w okolicy Warszawy. Badania zostały wykonane na dwóch obszarach badawczych: pierwszy był zlokalizowany na tarasie zalewowym rzeki Wisły natomiast drugi na tarasie nadzalewowym w obrębie torfowiska. Do badań georadarowych wykorzystano anteny o częstotliwości 250 oraz 500 MHz. W efekcie przeprowadzonych badań została zobrazowana budowa wewnętrzna tarasów rzecznych oraz odwzorowany relief starego koryta na obszarze, gdzie jest ono przykryte torfami. Przedstawione wyniki badań potwierdzają, że nieinwazyjna metoda, jaką są pomiary GPR, jest użyteczna w interpretacji architektury wewnętrznej piaszczystych osadów rzeki roztokowej.

**Abstract:** The paper presents the results of Ground Penetrating Radar (GPR) measurements carried out in Natura 2000 areas near Warsaw. The research was carried out in two research areas: the first was located on the Vistula River flood terrace and the second on the lower upper terrace within the peatland. The antennas with frequency 250 and 500 MHz were used for GPR investigations. As a result of the conducted research, the internal architecture of river terraces has been illustrated and the relief of the old riverbed is depicted in the area where it is covered by peats. The presented research results confirm that the non-invasive method, such as GPR measurements, is useful in the interpretation of the internal architecture of sandy braided river deposits.

**Słowa kluczowe:** metoda georadarowa (GPR), facje radarowe, rzeka roztokowa, osady rzeczne, Wisła, badania na obszarach Natura 2000

**Key words:** Ground Penetrating Radar (GPR), radar facies, braided river, fluvial deposits, Vistula River, research in Natura 2000 areas

---

Wpłynęło: 15.11.2017  
Zaakceptowano: 18.02.2018

**Zalecany sposób cytowania:** Lejzerowicz A, Kowalczyk S., 2018, Użyteczność badań GPR do identyfikacji cech wewnętrznych osadów rzeki Wisły na obszarach NATURA 2000, *Prace i Studia Geograficzne*, 63.2, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 7-20.

## WPROWADZENIE

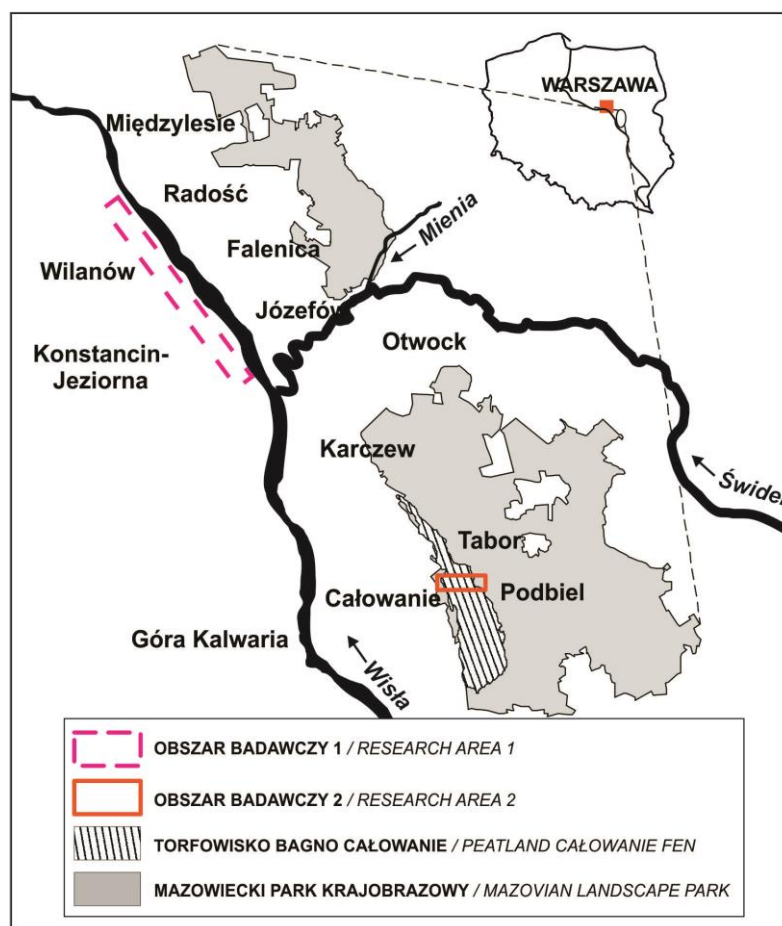
Metoda georadarowa – GPR (ang. *Ground Penetrating Radar*) dostarcza w sposób nieinwazyjny wysokorozdzielcze i ciągle obrazy falowe (tzw. radargramy albo echogramy), co pozwala na uzyskanie informacji o budowie wewnętrznej form depozycyjnych i osadach je budujących. Najwięcej badań z zakresu geologii z wykorzystaniem GPR jest wykonywanych w osadach aluwialnych. Wynika to z dużego rozprzestrzenienia tego typu osadów, ich znaczenia jako płytkich warstw wodonośnych, jak również z faktu, iż w niewielkim stopniu tłumią falę elektromagnetyczną. Osady i środowisko aluwialne były badane z wykorzystaniem GPR przez wielu badaczy, m.in. przez Leclerc'a i Hickina (1997), Vandenberghe'a i van Overmeere'na (1999), Skelly'ego i in. (2003), Woodwarda i in. (2003), Lunta i in. (2004), Sambrook Smitha i in. (2006), Hickina i in. (2009), Rice i in. (2009), Ashwortha i in. (2011). Badania przeprowadzone przez J. Vandenberghe'a i R.A. van Overmeere'na (1999) wykazały, że na przekrojach georadarowych w osadach rzek meandrujących, roztokowych oraz typu przejściowego można wyróżnić charakterystyczne dla danego typu rzeki facje radarowe. Facje radarowe (ang. *radar facies*) można zdefiniować jako sumę wszystkich charakterystycznych wzorów refleksów wytwarzanych przez konkretny osad – są to więc widoczne różnice we wzorach refleksów obserwowanych w profilach GPR (van Overmeeren 1998).

Do takiego samego wniosku doszli J. Olszak i J. Karczewski (2008), którzy badali tarasy rzeki Kamienicy w polskich Karpatach zewnętrznych. Badania prowadzone w obrębie płytkiej, roztokowej, piaskodennej rzeki Niobrara doprowadziły do zidentyfikowania zestawu facji radarowych reprezentujących różne elementy architektoniczne charakterystyczne dla tego typu rzek (Skelly i in. 2003). J. Woodward i in. (2003) opisali najważniejsze kroki, jakie trzeba wykonać, aby przetworzyć i zinterpretować dane GPR w obrębie piaszczystych osadów na przykładzie rzeki South Saskatchewan. Badania przeprowadzone przez I.A. Lunta i in. (2004) dały możliwość zaproponowania trójwymiarowego ilościowego modelu depozycji osadów zwirowych rzeki roztokowej na podstawie, między innymi, pomiarów georadarowych. G.H. Sambrook Smith i in. (2006) zastosowali GPR do opisu i oszacowania odsypów w obrębie osadów rzeki South Saskatchewan. Kolejne badania w obrębie osadów rzeki South Saskatchewan z wykorzystaniem GPR pokazały ewolucję koryta rzeki i akumulację odsypów (Ashworth i in. 2011). Badania te wykazały, że w dobrze wysortowanych piaszczystych osadach rzeki roztokowej można rozróżnić facje korytowe i odsypy pozakorytowe. W Polsce tylko kilku geologów wykorzystało w badaniach osadów aluwialnych metodę GPR (np. Haczewski i Kukulak 2004, Olszak i Karczewski 2008, Słowik 2011, 2012, Żuk i Sambrook Smith 2015). M. Słowik (2011, 2012) zastosował GPR w dolinie rzeki Obry analizując zakres głębokości i rozdzielczości badań georadarowych w różnych warunkach hydrogeologicznych oraz w różnej konfiguracji parametrów sprzętu georadarowego. Przeprowadzone pomiary wykazały wysoki wpływ zawartości wody w ośrodku geologicznym na zasięg głębokościowy badań oraz na rozdzielczość pomiaru.

Prezentowane w niniejszym artykule badania geofizyczne zostały przeprowadzone na tarasie zalewowym Wisły w rejonie Kępy Zawadowskiej, na obszarze rezerwatu przyrody Wyspy Świderskie oraz na tarasie nadzalewowym Wisły na obszarze torfowiska Bagno Całowanie. Celem niniejszej pracy było wykazanie użyteczności metody georadarowej w badaniach odsypów i tarasów rzecznych na przykładzie piaskodennej rzeki roztokowej (Wisła) okolic Warszawy. Pomiary GPR miały za zadanie szczegółowo scharakteryzować architekturę wewnętrzną piaszczystych osadów aluwialnych oraz odzwierciedlić morfologię tarasów rzecznych.

## TEREN BADAŃ

Do badań wytypowano dwa obszary badawcze: pierwszy, przylegający bezpośrednio do koryta rzeki (odsypy rzeczne); drugi, na niższym tarasie nadzalewowym (ryc. 1). Oba obszary badawcze są objęte programem Natura 2000.



**Ryc. 1.** Szkic lokalizacyjny obszarów badawczych: 1 – zlokalizowany na piaszczystych odsypach rzeki Wisły, przylegający bezpośrednio do koryta rzecznej (obszar Kępy Zawadowskiej oraz Wysp Świderskich), 2 – Bagno Całowanie znajdujące się na niższym tarasie nadzalewowym rzeki Wisły w obrębie Mazowieckiego Parku Krajobrazowego

**Fig. 1.** Localization sketch of research areas: 1 – located on the sandy banks of the Vistula River, adjacent to the riverbed, 2 – Całowanie Fen located on the lower upper terrace of the Vistula River within the Mazovian Landscape Park

Źródło: opracowanie własne  
Source: author's own elaboration

Pierwszy obszar badań znajduje się po lewej stronie Wisły, na południowym skraju Warszawy (ryc. 1) – Wisła w swoim środkowym biegu charakteryzowana jest jako piaskodenna rzeka roztokowa (Babiński 1992, Falkowski 2006). Ten typ rzeki charakteryzuje się przewagą depozycji nad erozją i zawiera liczne odsypy śródkorytowe (np. podłużne czy poprzeczne). W obrębie pierwszego obszaru badawczego wyodrębniono poligony obejmujące dwa rezerваты: Wyspy Zawadowskie i sąsiadujące

z nimi Wyspy Świderskie. Pierwszy poligon składa się z aktywnej strefy korytowej Wisły o sukcesywnie modelowanej, nieustabilizowanej powierzchni, deniwelacjach w granicach 5 m, wzniesionej 0-5 m ponad zwierciadło wody w Wiśle (Lejzerowicz i in. 2014), oddzielonej wałem przeciwpowodziowym (ul. Wał Zawadowski) od nieaktywnej strefy korytowej na zawału. Drugi poligon badawczy zlokalizowany jest w obrębie rezerwatu przyrody Wyspy Świderskie na obszarze piaszczystych odsypów rzecznych. Poligon badawczy znajduje się na terenie przylegającym do głównego koryta Wisły, który sezonowo odcinany jest od lądu przez tymczasowy kanał rzeczny. Przy wysokich stanach wody w rzece jest częściowo zalewany.

Drugi obszar badawczy wybrano na torfowisku Bagno Całowanie, które zlokalizowane jest na południowy wschód od Warszawy i niemal w całości znajduje się w granicach Mazowieckiego Parku Krajobrazowego (ryc. 1). Rozciąga się ono łukiem na długości około 15 km i szerokości dochodzącej do 3 km. Powierzchnia Bagna Całowanie wynosi około 1200 hektarów. Torfowisko Bagno Całowanie powstało w porzuconym korycie rzeki Wisły, w obrębie niższego tarasu nadzalewowego Wisły. W obrębie Bagna Całowanie wśród utworów organicznych występuje zespół wydm powstałych na formach akumulacji osadów rzecznych takich jak odsypy (np. Góra Niedźwiedzia) lub wyspy mieliżnowe tworzące „wyspy” mineralne w obrębie torfowiska (np. Góra Pękatka). Są to wydmy zaczątkowe charakteryzujące się 2-3 metrową wysokością względem powierzchni torfowiska oraz szerokością 20-30 m i długością dochodzącą do kilkudziesięciu metrów (Baraniecka 1982).

## METODA BADAŃ

Metoda georadarowa jest wysokorozdzielczą metodą elektromagnetyczną znakomicie nadającą się do badań płytko występujących utworów. Ze względu na swój nieinwazyjny charakter badania z użyciem GPR mogą być wykorzystywane na obszarach takich jak rezerwaty przyrody czy parki narodowe – w miejscach, w których korzystanie z metod inwazyjnych nie jest dozwolone lub nie jest możliwe. Dlatego też zastosowano ją w badaniach odsypów i tarasów rzecznych na poligonach znajdujących się w obrębie Obszarów Natura 2000 będących częścią Europejskiej Sieci Ekologicznej.

W badaniach GPR wysyłany jest impuls fali elektromagnetycznej o znanej, zadanej częstotliwości. Energia fali elektromagnetycznej docierając do granicy ośrodków różniących się parametrami elektrycznymi ulega częściowemu odbiciu oraz załamaniu jak również częściowo zostaje wytłumiona (Daniels 2004). Impuls odbity od takiej granicy wracając jest rejestrowany na powierzchni przez antenę odbiorczą. Granice właściwości elektrycznych ośrodka geologicznego niekoniecznie muszą być tożsame z granicami litologicznymi. Amplituda odbitego impulsu elektromagnetycznego jest proporcjonalna do wielkości współczynnika odbicia na granicy dwóch ośrodków fizycznych. Wartość współczynnika odbicia ( $R$ ) jest zależna od wartości stałej dielektrycznej powyżej ( $\epsilon_{r1}$ ) i poniżej ( $\epsilon_{r2}$ ) granicy tych ośrodków. Stała dielektryczna zwana również względną przenikalnością elektryczną jest parametrem bezwymiarowym i charakteryzującym rozchodzenie się fal o wysokich częstotliwościach w ośrodku i wskazującym, ile razy przenikalność danego ośrodka jest większa od przenikalności elektrycznej próżni ( $\epsilon_0$ ). W zarejestrowanych obrazach, radargramach, możemy zobaczyć odbite refleksy będące efektem odbicia się fali elektromagnetycznej od granic ośrodków różniących się przede wszystkim wartościami stałej dielektrycznej ( $\epsilon_r$ ). W uproszczeniu można stwierdzić, że jakość danych na radargramie, czyli siła refleksów i wielkość amplitudy, jest zależna od kontrastu właściwości elektrycznych pomiędzy dwoma ośrodkami. W tabeli 1 zaprezentowane zostały wartości stałej dielektrycznej ( $\epsilon_r$ ) dla różnych ośrodków.

**Tabela 1.** Wartości względnej przenikalności elektrycznej (stałej dielektrycznej -  $\epsilon_r$ ) i prędkości fali elektromagnetycznej różnych ośrodków

**Table 1.** Values of relative permittivity (dielectric constant -  $\epsilon_r$ ) and electromagnetic wave velocity of different medium

Ośrodek / Medium	Stała dielektryczna / Dielectric constant $\epsilon_r$	Prędkość fali / Wave velocity (m/ns)	Źródło / Source
Powietrze /air	1	0,3	Conyers i Goodman 1997
Śnieg /snow	1,5	0,24	Conyers i Goodman 1997
Lód /ice	4	0,15	Conyers i Goodman 1997
Piasek suchy/dry sand	4-6	0,12-0,15	Conyers i Goodman 1997
Piasek mokry /wet sand	15-25	0,06-0,08	Conyers i Goodman 1997
Torf mokry / wet peat	56	0,04	Lamparski 2004
Torf / peat	61,5	0,04	Conyers i Goodman 1997
Grunty organiczne / organic soils	64	0,04	Conyers i Goodman 1997
Torf /peat	51,4-70,4	0,04	Slater i in. 2001
Torf /peat	57-80	0,03-0,04	Neal 2004
Woda (słodka lub słona) /Fresh water or saltwater	81	0,03	Conyers i Goodman 1997

Źródło: Zestawienie własne na podstawie Conyers i Goodman 1997, Slater i in. 2001, Lamparski 2004, Neal 2004  
Source: Own statement based on Conyers i Goodman 1997, Slater i in. 2001, Lamparski 2004, Neal 2004

Podczas badań terenowych wykorzystano sprzęt firmy Malå Geoscience, model ProEx wraz z jednokanałową ekranowaną anteną o częstotliwości 500 oraz 250 MHz. W tym przypadku antena nadawcza i antena odbiorcza są zamknięte razem w jednej obudowie – anteny georadaru zawsze znajdują się w stałej odległości od siebie (*common offset*). Antena była ciągnięta bezpośrednio po podłożu a odległość była rejestrowana za pomocą kółka pomiarowego. Dane były rejestrowane cyfrowo z wykorzystaniem oprogramowania GroundVision 2. Na obszarze Bagna Całowanie pomiary GPR zostały wykonane, kiedy teren był przykryty (wyrównany) warstwą śniegu. Taką metodykę pomiarów przyjęto, aby wyeliminować niekorzystny wpływ dwóch czynników: wody oraz nierówności terenu. Swobodne zwierciadło wody podziemnej utrzymuje się tutaj na wysokim poziomie. Okresowo woda występuje nawet na powierzchni terenu. Nierówności terenu są efektem występowania bogatej roślinności, przede wszystkim kęp turzyc, które utrudniają wykonanie pomiarów GPR oraz ich późniejsze przetwarzanie i interpretacje.

Uzyskane w terenie dane zostały przetworzone w programie ReflexW (Sandmeier 2011) za pomocą standardowych procedur mających na celu poprawić stosunek S/N (*Signal/Noise*) i korelację refleksów użytecznych. W tym celu wykonano korekcję czasu pierwszego wstąpienia (*static correction*), usunięcie szumu tła (*background removal*) oraz usunięcie niskoczęstotliwościowych zakłóceń (*dewow*) wzmocnienie sygnału (*manual gain*), filtrację częstotliwościową (*bandpass frequency*). Dla lepszej wizualizacji przeprowadzono uśrednianie dwuwymiarowe (*average xy*). Na końcu dokonano konwersji czasowo-głębokościowej na podstawie prędkości określonej poprzez dopasowanie funkcji hiperboli prędkości do ugięć na przekroju georadarowym uzyskany anteną ekranowaną o częstotliwości 500 oraz 250 MHz. Na podstawie przetworzonego materiału pomiarowego stworzono model granic ośrodków o znaczącym kontraście właściwości dielektrycznych.

Trójwymiarowy model powierzchni osadów mineralnych przykrytych torfami na Bagnie Całowanie był przygotowywany kilkietapowo. W programie ReflexW (Sandmeier 2011) stworzono model warstw fizycznych dla każdego z 25 równoległych do siebie pomiarów (co 0,4 m) o długości około 50 m. Następnie, od rzędnej terenu, uzyskanej z numerycznego modelu terenu (*Digital Elevation Model*), odjęto grubość warstwy śniegu oraz miąższość torfu. Dalsza analiza i wizualizacja wykonana została w programie ArcGIS for Desktop. Do integracji danych, o zagęszczeniu punktów pomiarowych wynoszącym 50/1 m<sup>2</sup>, wykorzystano aplikację ArcMap. Stosując *kriging* jako metodę interpolacji został stworzony model stropu podłoża mineralnego. Do wizualizacji danych wykorzystano aplikację ArcScene.

## WYNIKI BADAŃ

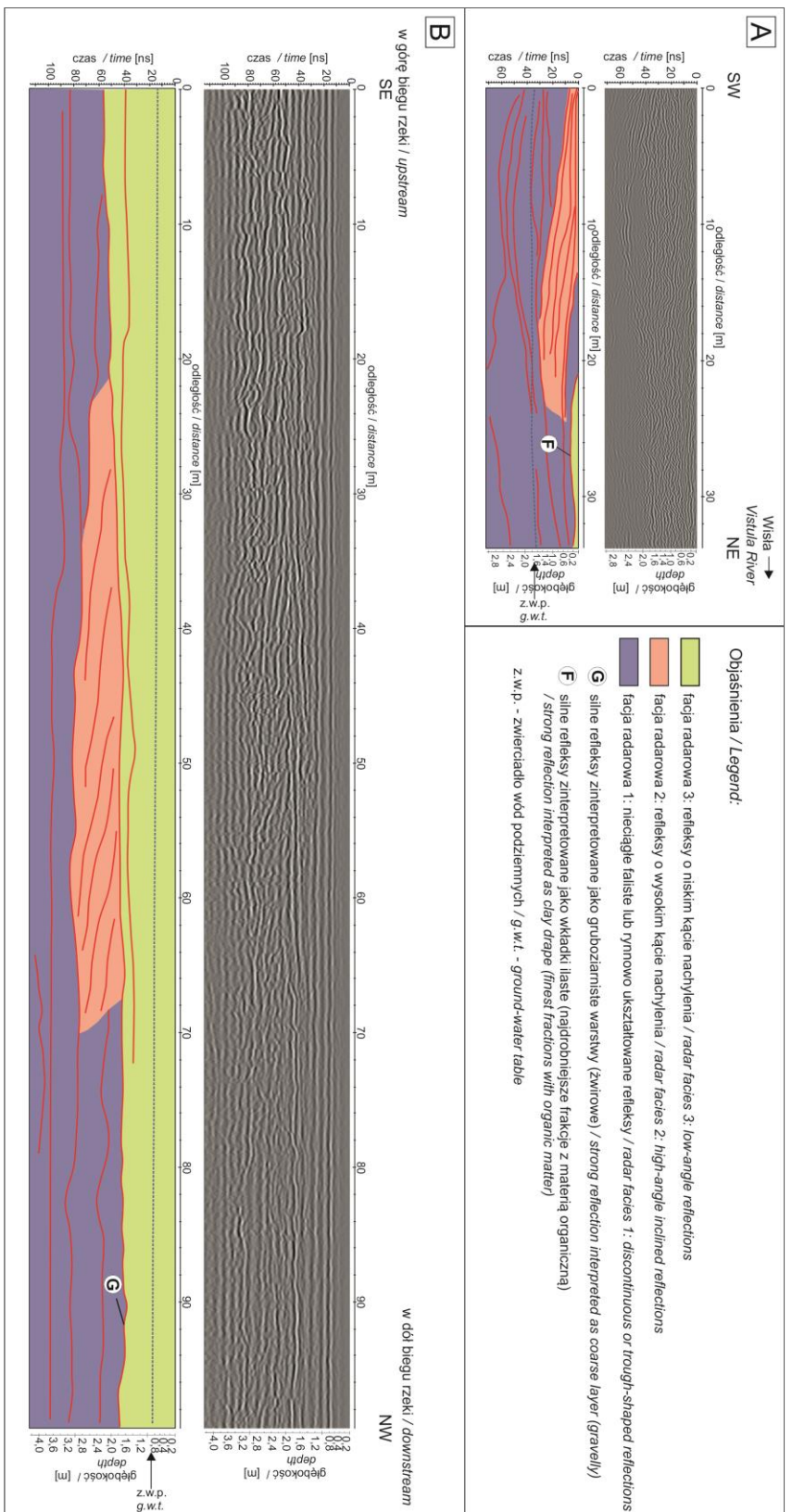
### Obszar badawczy 1 – piaszczyste odsypy rzeki Wisły

Otrzymane radargramy z poligonu zlokalizowanego na Kępie Zawadowskiej charakteryzują się wysoką rozdzielczością i dobrze obrazują budowę wewnętrzną odsypów rzecznych. Charakterystyczne wzory refleksów na obrazach GPR pozwoliły na zidentyfikowanie facji radarowych pozwalających na charakterystykę przepływów wody w rzece w przeszłości.

Na Kępie Zawadowskiej (ryc. 2) wyróżniono trzy charakterystyczne facje radarowe (Lejzerowicz i in. 2014):

- facja radarowa 1: nieciągłe faliste lub rynnowo ukształtowane refleksy – czasami refleksy te wyglądają dosyć chaotycznie;
- facja radarowa 2: refleksy o wysokim kącie nachylenia – refleksy równoległe do siebie, zapadające pod kątem co najmniej 6°;
- facja radarowa 3: refleksy o niskim kącie nachylenia – refleksy leżące prawie płasko, zapadające pod kątem mniejszym niż 6°.

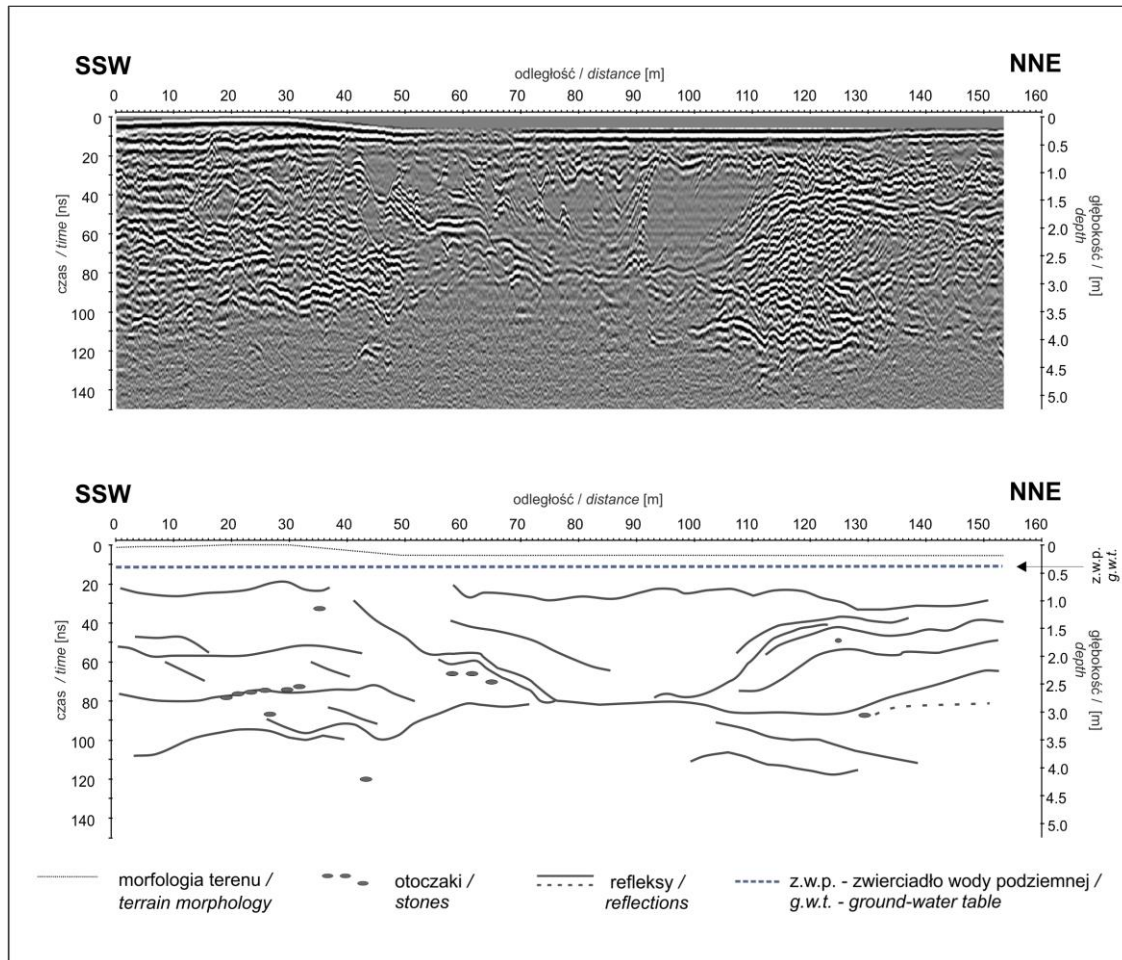
Profile GPR z poligonu badawczego zlokalizowanego na terenie Rezerwatu Przyrody Wyspy Świderskie (ryc. 1) charakteryzują się występowaniem refleksów o niskim kącie nachylenia (ryc. 3). Wybrany poligon badawczy przylega bezpośrednio do kryta rzeki, osady tam występujące poddawane są ciągłym zmianom związanym z wodami płynącymi Wisły, są rozmywane przez rzekę podczas wysokich stanów wody (Lejzerowicz i Kowalczyk 2016). Na profilu GPR (ryc. 3) widoczne są wyraźne powierzchnie oraz wcięcia erozyjne – jest to m.in. tymczasowy kanał rzeczny widoczny w morfologii piaszczystego odsypu, przebiegający równoległe do biegu rzeki. Obecność takich powierzchni erozyjnych wskazuje na naprzemienne etapy erozji dna i akumulacji osadów. Profil georadarowy został wykonany prostopadle do głównego nurtu Wisły i można na nim zaobserwować nieznaczne zapadanie warstw w kierunku koryta rzeki. Widoczne są również otoczaki, które zostały deponowane na powierzchniach erozyjnych – występują one pojedynczo lub w postaci nagromadzeń w miejscach występowania osadów odpornych na erozję. Obecność trudno rozmywalnych wyniesień starszego podłoża (osady pliocenские) prawdopodobnie spowodowała migrację głównego nurtu Wisły (Falkowski 2007).



**Ryc. 2.** Profile GPR wykonane na obszarze przylegającym bezpośrednio do Wisły (ryc. 1 – obszar badawczy 1) w rejonie Kępy Zawadowskiej wraz z interpretacją: A – radarogram prostopadły do biegu rzeki Wisły (antena o częstotliwości 500 MHz), B – radarogram równoległy do biegu rzeki Wisły (antena o częstotliwości 250 MHz). Na poligonie badawczym wyróżniono trzy główne typy facji radarowych charakterystycznych dla płaskodennej rzeki roztokowej jaką jest rzeka Wisła

**Fig. 2.** GPR profiles made in the area directly adjacent to the Vistula River (Fig. 1 – research area 1) in Kępa Zawadowska area with interpretation: A – radarogram perpendicular to the Vistula River (500 MHz antenna), B – radarogram parallel to the Vistula River (250 MHz antenna). Three main types of radar facies characteristic for the sand-bed braided river (the Vistula River) were distinguished

Źródło: opracowanie własne na podstawie Lejzerowicz i in. (2014) / Source: author's elaboration based on Lejzerowicz et al. (2014)



**Ryc. 3.** Wyniki badań GPR (antena 250 MHz) przeprowadzonych na drugim poligonie badawczym (lokalizacja przedstawiona na ryc. 1) na obszarze Rezerwatu Przyrody Wyspy Świderskie: radargram wraz z interpretacją

**Fig. 3.** Results of GPR investigations (250 MHz antenna) conducted at the second research area (for location see Fig. 1) in the Świderskie Island Nature Reserve: radargram with interpretation

Źródło: opracowanie własne na podstawie Lejzerowicz, Kowalczyk (2016)

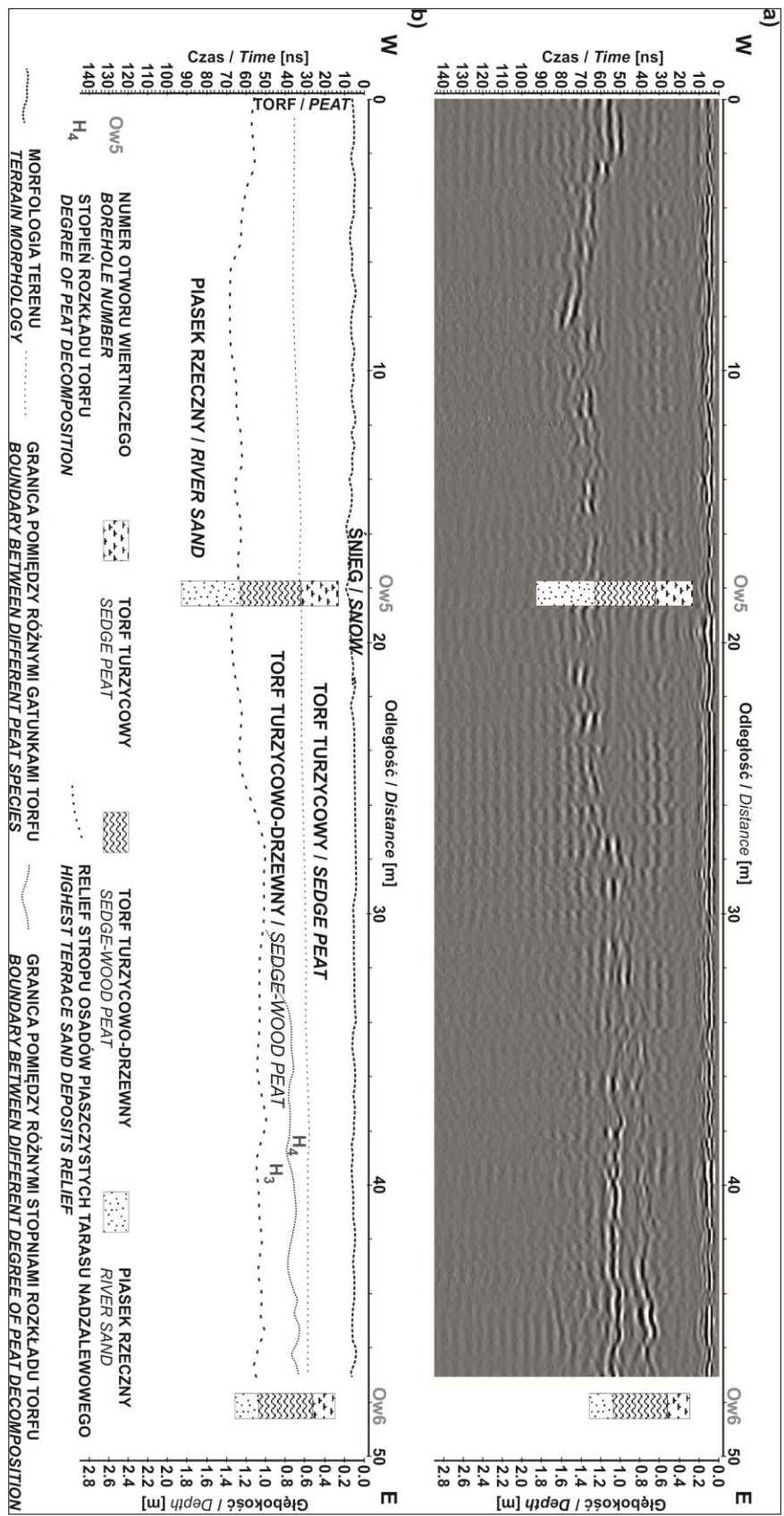
Source: author's elaboration based on Lejzerowicz, Kowalczyk (2016)

### Obszar badawczy 2 – Bagno Całowanie

Pomiary GPR wykonane na Bagnie Całowanie miały przede wszystkim za zadanie odwzorowanie reliefu starego koryta Wisły przed sedimentacją torfów. Weryfikacji profili georadarowych posłużyły wiercenia wykonane w obrębie poligonu badawczego. Na każdym z echogramów (radargram) zaobserwowano kilka silnych refleksów (ryc. 4):

- pierwszy z nich, odwzorowujący powierzchnię morfologiczną terenu, powstał na granicy między śniegiem a gruntem;
- kolejne wskazują na zróżnicowanie gatunkowe torfów jak i zróżnicowanie właściwości fizycznych w ich obrębie. Szczegółowo zostało to przedstawione w publikacji S. Kowalczyka i in. (2014);
- ostatni silny refleks występuje na granicy pomiędzy torfami a podłożem mineralnym jakim są piaski tarasu nadzalewowego Wisły.





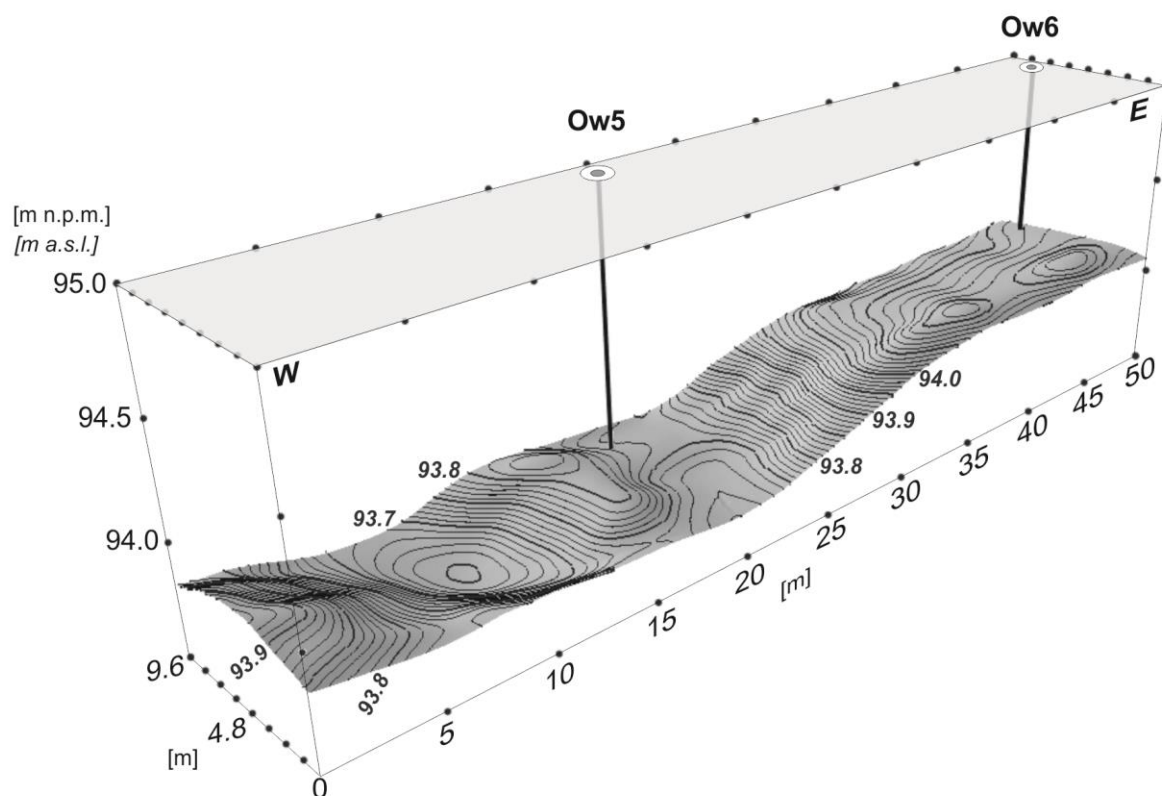
Ryc. 4. Profil GPR zlokalizowany na Bagnie Całowanie: radargram wraz z interpretacją

Fig. 4. GPR profile located in Całowanie Fen: radargram with interpretation

Źródło: opracowanie własne na podstawie Kowalczyk i in. (2014)

Source: author's elaboration based on Kowalczyk et al. (2014)

Na uzyskanych radargramach (ryc. 4) nie widać warstwowań w utworach piaszczystych, które są rozpoznawalne na radargramach osadów budujących taras zalewowy Wisły w Warszawie (Lejzerowicz i in. 2014, Lejzerowicz i Kowalczyk 2016). Najprawdopodobniej jest to efektem tłumienia (*attenuation*) fali elektromagnetycznej przez nawodnione torfy. Efektem końcowym interpretacji badań georadarowych pokazującym relief stropu osadów piaszczystych tarasu nadzalewowego jest model powierzchni przedstawiony na ryc. 5. Model ten opracowano w oparciu o informacje pozyskane w wyniku profilowań georadarowych oraz potwierdzono wierceniami. Określenie geometrii powierzchni depozycyjnych torfów cechuje się wysoką precyzją i zgodnością z punktową informacją z wierceń. Ta zbieżność nie jest niczym zaskakującym. Z badań georadarowych P. Lamparskiego (2004) przeprowadzonych na niewielkich torfowiskach wynika, że współczynnik korelacji dla określenia głębokości zalegania gruntów organicznych z odczytów georadarowych a pomiarem z wierceń wynosi 0,99.



**Ryc. 5.** Relief stropu osadów piaszczystych tarasu nadzalewowego będący powierzchnią sedimentacji torfów  
**Fig. 5.** Relief of sandy sediment surface of the lower upper terrace, as the basis of peat sedimentation

Źródło: Kowalczyk i in. (2014)  
 Source: Kowalczyk et al. (2014)

## DYSKUSJA

Badania GPR wykonano w celu opisanego budowy wewnętrznej osadów i wskazania charakterystycznych refleksów w odsypach Wisły z okolic Warszawy. Otrzymane radargramy z dwóch obszarów badawczych charakteryzują się danymi o wysokiej rozdzielczości i dobrze obrazują budowę wewnętrzną piaszczystych osadów. Obraz georadarowy może być pomocny w identyfikacji położenia wcześniej wydzielonych i opisanych w odsłonięciach typów budowy wewnętrznej osadów rzecznych.

Interpretacja otrzymanych profili z pierwszego obszaru badawczego (ryc. 1 – lokalizacja; poligon badawczy Kępa Zawadowska) pozwoliła na rozpoznanie trzech charakterystycznych facji radarowych (zostały one również wyróżnione przez G.H. Sambrook Smitha i in. 2006 oraz P.J. Ashwortha i in. 2011): nieciągłe faliste lub rynnowo ukształtowane refleksy (facja radarowa 1), refleksy o wysokim kącie nachylenia (facja radarowa 2), oraz refleksy o niskim kącie nachylenia (facja radarowa 3). We wszystkich profilach GPR na tym poligonie (ryc. 2) dominują refleksy facji radarowej 1 i są one typowe dla obecnego typu depozycyjnego Wisły (Lejzerowicz i in. 2014). Obecność charakterystycznych facji radarowych w profilach GPR i ich zmienność rozkładu ze względu na zmieniającą się przestrzennie litologię w piaszczystych odsypach Wisły, jest dość dobrze porównywalna z innymi współczesnymi piaskodennymi rzekami roztokowymi (Vandenberghe i Van Overmeeren 1999, Van Dam i Schlager 2000, Skelly i in. 2003, Woodward i in. 2003, Neal 2004, Sambrook Smith i in. 2006, Ashworth i in. 2011).

Wykonane badania GPR na piaszczystym odsypie przylegającym bezpośrednio do koryta rzeki (ryc. 1 – lokalizacja; poligon badawczy zlokalizowany w rejonie Rezerwatu Przyrody Wyspy Świderskie) pozwoliły na zaznaczenie zwierciadła wód podziemnych – było to możliwe, ponieważ wysokość samego odsypu była bardzo zbliżona do poziomu wody w rzece. Interpretacja profili GPR wykazała obecność licznych powierzchni i wcięć erozyjnych, jak również wskazano obecność otczaków (ryc. 3).

Przeprowadzone badania na obszarze torfowiska Bagno Całowanie umożliwiły bardzo dokładne określenie morfologii podłoża torfów, czyli określenie reliefu powierzchni osadów piaszczystych tarasu nadzalewowego. Tak precyzyjne odwzorowanie tej powierzchni byłoby niezwykle trudne do uzyskania przy zastosowaniu jedynie analizy danych pochodzących z wierceń. Zbyt silne tłumienie sygnału nie pozwoliło na wykrycie warstwowań w utworach piaszczystych i charakterystykę struktury wewnętrznej tarasu.

## WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały przydatność metody GPR do badań osadów rzeki Wisły okolic Warszawy, co było celem niniejszej pracy. Wyniki badań GPR pokazują, że ta nieinwazyjna metoda rzeczywiście jest bardzo użyteczna w interpretacji architektury wewnętrznej piaszczystych osadów rzeki roztokowej w środkowym biegu Wisły.

Metoda GPR może być dobrym narzędziem do rozpoznawania architektury starszych osadów rzecznych np. plejstoceńskich tarasów na europejskich nizinach. Dodatkowo potwierdzono, że antena o częstotliwości 250 MHz zapewnia bardziej czytelne, ale mniej szczegółowe obrazy niż te uzyskane za pomocą anteny o częstotliwości 500 MHz.

## Literatura

- Ashworth P.J., Sambrook Smith G.H., Best J.L., Bridge J.S., Lane S.N., Lunt I.A., Reesink A.J.H., Simpson C.J., Thomas R.E., 2011, Evolution and sedimentology of a channel fill in the sandy braided South Saskatchewan River and its comparison to the deposits of an adjacent compound bar, *Sedimentology*, 58, 1860-1883.
- Babiński Z., 1992, Współczesne procesy korytowe dolnej Wisły, *Prace Geograficzne*, 157.
- Baraniecka M. D., 1982, Wydmy okolic Otwocka na tle budowy geologicznej. *Biuletyn Instytutu Geologicznego* 337, *Z badań czwartorzędu w Polsce t. XXVI*, 5-32.
- Conyers L.B., Goodman D., 1997, *Ground-Penetrating Radar: An introduction for Archaeologists*. Altamira Press, Walnut Creek, California.
- Daniels D.J., 2004, *Ground penetrating radar*, 2nd edition. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.
- Falkowski T., 2006, *Naturalne czynniki stabilizujące wybrane odcinki strefy korytovej Wisły środkowej*, *Rozprawy naukowe i monografie SGGW*, 312.
- Falkowski T., 2007, Geomorphologic analysis of the river terrace as an element in the geological engineering prognosis of the regulation structures safety, *Geologos*, 11, 163-172.
- Haczewski G., Kukulak, J., 2004, Early Holocene landslide-dammed lake in Bieszczady Mountains (Polish Eastern Carpathians) and its evolution, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 38, 83-96.
- Hickin A.S., Kerr B., Barchyn T.E. Paulen, R.C., 2009, Ground-penetrating radar and capacitively coupled resistivity to investigate fluvial architecture and grain-size distribution of a gravel floodplain in Northeast British Columbia, Canada, *Journal of Sedimentary Research*, 79, 457-477.
- Jol H.M., 2009, *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, Elsevier, England.
- Kowalczyk S., Łukasiak D., Żukowska K., 2014, *Ground penetrating radar survey in the central and eastern part of the Całowanie Fen, Central Poland*, Proceedings of 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, 1041-1046.
- Lamparski P., 2004, Formy i osady czwartorzędowe w świetle badań georadarowych, *Prace Geograficzne*, 194, 115 s.
- Leclerc R.F., Hickin E.J., 1997, The internal structure of scrolled floodplain deposits based on ground penetrating radar, North Thompson river, British Columbia, *Geomorphology*, 21, 17-38.
- Lejzerowicz A., Kowalczyk S., Wysocka A., 2014, The usefulness of ground-penetrating radar images for the research of a large sand-bed braided river: case study from the Vistula River (central Poland), *Geologos*, 20 (1), 35-47.
- Lejzerowicz A., Kowalczyk S., 2016, *Fluvial architecture of Vistula River deposits in Nature Reserve Świdzkie Islands (Warsaw area, central Poland) based on Ground Penetrating Radar (GPR) images*, Proceedings of 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2016), 1-6.
- Lunt I.A., Bridge J.S., Tye R.S., 2004, A quantitative, three-dimensional model of gravelly braided rivers, *Sedimentology*, 51, 377-414.
- Neal A., 2004, Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress, *Earth-Science Review*, 66, 261-330.
- Olszak J., Karczewski J., 2008, Usefulness of GPR measurements in interpretation of structures of river terraces (Kamienica River Valley, Polish Outer Carpathians), *Przegląd Geologiczny*, 56, 330-334.
- Rice S.P., Church M., Woolridge C.L., Hickin E.J., 2009, Morphology and evolution of bars of a wandering gravel-bed river; lower Fraser river, British Columbia, Canada, *Sedimentology*, 56, 709-736.
- Sambrook Smith G.H., Ashworth P.J., Best J.L., Woodward J., Simpson C.J., 2006, The sedimentology and alluvial architecture of the sandy braided South Saskatchewan River, Canada, *Sedimentology*, 53, 413-434.
- Sandmeier K.J., 2011, *ReflexW Version 6.0 – program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data*, Reference Manual, Germany.

- Skelly R.L., Bristow Ch.S., Ethridge F.G., 2003, Architecture of channel-belt deposits in an aggrading shallow sandbed braided river: the lower Niobrara river, northeast Nebraska, *Sedimentary Geology*, 158, 249–270.
- Slater L., Reeve A., Glaser D., 2001, *Improving understanding of peatland hydrogeology using electrical geophysics*, Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Environmental & Engineering Problems (SAGEEP), March 4-7, 2001, Denver, CO, 10 s.
- Słowik M., 2011, Reconstructing migration phases of meandering channels by means of ground-penetrating radar (GPR): the case of the Obra River, Poland, *Journal of Soils and Sediments*, 11, 1262-1278.
- Słowik M., 2012, Influence of measurement conditions on depth range and resolution of GPR images: The example of lowland valley alluvial fill (the Obra River, Poland), *Journal of Applied Geophysics*, 85, 1-14.
- Van Dam R. L., Schlager W., 2000, Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analyses, *Sedimentology*, 47, 435-450.
- Van Dam R. L., 2001, *Causes of ground-penetrating radar reflections in sediment*, PhD thesis, VU University Amsterdam.
- Vandenberghe J., van Overmeeren R.A., 1999, Ground penetrating radar images of selected fluvial deposits in the Netherlands, *Sedimentary Geology* 128, 245-270.
- van Overmeeren R.A., 1998, Radar facies of unconsolidated sediments in The Netherlands: a radar stratigraphy interpretation method for hydrogeology, *Journal of Applied Geophysics*, 40, 1-18.
- Woodward J., Ashworth P.J., Best J.L., Sambrook Smith G.H., Simpson C.J., 2003, The use and application of GPR in sandy fluvial environments: methodological considerations, [w:] C.S. Bristow and H.M. Jol (red.) *Ground Penetrating Radar in Sediments*, *Geological Society London Special Publications*, 211, 127-142.
- Żuk T., Sambrook Smith G.H., 2015, Stratygrafia radarowa – metoda analizy danych georadarowych 3D w badaniu środowisk sedymentacyjnych na przykładzie osadów rzecznych, *Przegląd Geograficzny*, 87 (3), 439-456.

## Summary

Features described in this paper for the Vistula River in Warsaw area such as presence in GPR profiles characteristic radar facies (Kępa Zawadowska area) and their variability of distribution (presenting spatial arrangement of lithologically different units), have similarities to other modern sandy braided rivers (Vandenberghe and van Overmeeren 1999; van Dam and Schlager 2000; Skelly et al. 2003; Woodward et al. 2003; Neal 2004; Sambrook Smith et al. 2006; Ashworth et al. 2011): discontinuous undular or trough-shaped reflections (radar facies 1), high-angle inclined reflections (radar facies 2), and low-angle reflections (radar facies 3). In presented GPR profiles (fig. 2), there is a clear dominance of discontinuous undular or trough-shaped reflections (radar facies 1).

In GPR profile from study site in Nature Reserve Świderskie Islands (fig. 3) low-angle reflections are visible, due to wash-out of sediments by river waters when study site is flooded by river waters (Lejzerowicz and Kowalczyk 2016). Presented GPR profile (fig. 3) is characterized by the presence of erosional surface – this is a temporary river channel which is visible in morphology, parallel to the Vistula River main course. Velocity analysis of diffraction hyperboles allowed to identify the presence of stones which occur in isolation or form concentrations that look like thresholds.

The GPR measurements carried out in Całowanie Fen were primarily designed to model the relief of the old river bed of Vistula River before peats sedimentation. Verification of GPR profiles was made through drillings performed within the research area. As a result, a very precise reconstruction of the relief of the sandy deposits surface of the lower upper terrace was obtained. Too strong attenuation of the signal did not allow to detect sand stratification and to characterize the internal structure of the terrace.

GPR method gives the best results in sediments of varied structure and texture (Olszak and Karczewski 2008; Jol 2009). The most important factor in determining the visibility of reflections is the presence of water

in investigated deposits. Below the water table only the structural and lithological factors affect the visibility of reflections.

This study was conducted to verify the usefulness of Ground Penetrating Radar in investigations of sandy braided river deposits in the middle course of the Vistula River. GPR research results have shown that this non-invasive method is very useful in the interpretation of the architecture of alluvial deposits. It is concluded that the GPR method can be a good tool for recognizing the alluvial architecture of older deposits, e.g. of Pleistocene terraces in the European Lowlands. Presented results suggest that 250 MHz antenna provides clearer but less detailed images than those obtained with the 500 MHz antenna – therefore, an antenna with frequency of 250 MHz is recommended for studies of sandy alluvial deposits (Lejzerowicz et. al. 2014).