

BADANIA PŁYTKICH ZBIORNIKÓW WODNYCH ZA POMOCĄ METODY GPR

GPR investigation of shallow water reservoirs

Jerzy KARCZEWSKI & Jerzy ZIĘTEK

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Katedra Geofizyki;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: karcz@uci.agh.edu.pl, zietek@geol.agh.edu.pl*

Abstract: In the paper, the applicability of the GPR method for shallow depths investigations is presented. Factors which have essential influence on GPR measurements quality are shown. Measurement techniques used in such investigations are discussed with special regard to GPS application. Results obtained for different reservoirs are shown. To compare, results from sub-bottom profiler are included.

Key words: GPR, sub-bottom profiler, GPS, bottom sediments

Słowa kluczowe: metoda georadarowa, sub-bottom profiler, GPS, osady denne

WSTĘP

Za pomocą metod geofizycznych można z łatwością określić głębokość, położenie i kształt dna jezior i wolnopłynących rzek. Badane mogą być również osady denne – ich miąższość, struktura, rozprzestrzenienie oraz budowa podłoża tych utworów. Jeziora powoli, ale stale wypełniają się osadami. Miąższość osadów dennych w zbiornikach wodnych podlega dynamicznym zmianom. Zmiany te mogą być monitorowane metodami geofizycznymi. Znajomość dokładnej głębokości i rodzaju osadów dennych ma duże znaczenie w żegludze śródlądowej. Metodami geofizycznymi można również określać miąższość złóż podwodnych przeznaczonych do eksploatacji. Metody geofizyczne o dużej rozdzielczości są podstawową metodą w lokalizacji rurociągów i kabli przebiegających pod dnem jezior i rzek.

Zbiorniki wodne można badać za pomocą różnorodnych metod geofizycznych. Jedną z nich może być na przykład sejsmika inżynierska. Badania można wykonywać zimą na lodzie rozkładając geofony na śniegu (Baumgart-Kotarba *et al.* 2003), bądź też układając w jeziorze kabel hydrofonowy (string) – na dnie lub na powierzchni wody. W ten sposób można wykryć głównie utwory skonsolidowane.

Chieh-Hou Yang *et al.* (2002) zastosowali metodę *resistivity imaging* (aparatura McOHM 21 japońskiej firmy OYO) do badania jeziora Chung-Dah na północnym Tajwanie. Należy

podkreślić, że głębokość wody na badanym obszarze była niewielka, wynosiła do 1 m. Po między wodą a osadami dennymi, z reguły nieskonsolidowanymi istniał mały kontrast oporności. Pomiar taki charakteryzuje się małą rozdzielczością. Zbiorniki wodne można także badać za pomocą metody grawimetrycznej. Filina *et al.* (2006) za pomocą grawimetru (model BGM-3 firmy Bell AeroSpace) zainstalowanego na samolocie badali jeziora Concordia i Vostok we wschodniej Antarktyce. Zaletą tego typu badań była szybkość pomiarów, wadą natomiast niewielka rozdzielczość. Najlepszym urządzeniem do badania osadów dennych zbiorników wodnych jest *sub-bottom profiler* (SBP). Urządzenie emituje impuls akustyczny o częstotliwości od kilkuset herców do dwudziestu kilku kiloherców (a nawet do 200 kHz). Impuls propaguje w wodzie, wnika również bardzo głęboko w osady denne i podłoże. Zaletą tej metody jest bardzo duża głębokość penetracji, wadą z kolei mały zasięg w piaskach i żwirach (Lin *et al.* 2008). Metoda SBP charakteryzuje się natomiast bardzo dobrą rozdzielczością. W badaniach płytkich zbiorników wodnych coraz powszechniej stosowana jest metoda georadarowa (Ground Penetrating Radar). W założeniu swoim metoda używana jest w badaniach warstw przypowierzchniowych na lądzie, jednakże przy nieznacznej modyfikacji sprawdza się bardzo dobrze w badaniach wykonywanych na powierzchni wody. Podstawy fizyczne metody są opisane np. przez Karczewskiego (2007).

WPLYW ZANIECZYSZCZEŃ WODY NA ZASIĘG METODY GPR

Najważniejszym parametrem, mającym wpływ na zasięg metody georadarowej jest tłumienie fal elektromagnetycznych w wodzie. Tłumienie zależy od przewodności właściwej wody (zdolności wody do przewodzenia prądu elektrycznego). Im przewodność niższa, tym tłumienie fali elektromagnetycznej większe. Przewodność wody zależy wprost proporcjonalnie od jej mineralizacji (Macioszczyk & Dobrzyński 2002). Tak więc w wodach o podwyższonej mineralizacji (wodach akratopegowych) zasięg metody georadarowej drastycznie spada. Przewodność elektrolityczna wody wzrasta wraz ze wzrostem jej temperatury. Tak więc, wykonując pomiary na akwenie wodnym zimą powinno się teoretycznie uzyskać większy zasięg głębokościowy.

Podwyższona przewodność wody często również wskazuje na jej zanieczyszczenie (zwłaszcza chemiczne). Obecnie, niestety, większość jezior w Polsce nie mieści się w żadnej klasie czystości wód (Chełmicki 2001). Do głównych przyczyn tego stanu zaliczamy zrzuty ścieków komunalnych z ośrodków miejskich i turystycznych a także zanieczyszczenia rolnicze (spływające do jezior). W wodach silnie zanieczyszczonych zasięg metody georadarowej znacznie maleje.

METODYKA POMIAROWA

Pomiary można wykonywać zimą na powierzchni lodu, bądź też latem korzystając z pontonów, łodzi, kajaków. Pomiary zimowe (po powierzchni lodu) nie różnią się niczym od klasycznych pomiarów na lądzie. Można je wykonywać posługując się wyzwalaczem odległościowym lub w stałym interwale czasu. W trakcie pomiarów należy zwrócić uwagę, że jedynie na początku zimy lód tworzy jednorodną, litą warstwę na powierzchni wody. W miarę wahań temperatury, opadów śniegu, na powierzchni wody może wytworzyć się gruba strefa obejmująca

jąca warstwy śniegu, lodu, mieszaniny lodu z wodą. Fala elektromagnetyczna ulega odbiciu na każdej z granic i zarejestrowany obraz falowy jest bardzo trudny w interpretacji.

Podczas pomiarów wykonywanych latem jednym z głównych problemów jest dokładna lokalizacja linii profilu. Krótkie profile, przechodzące z brzegu na powierzchnię wody, można wykonywać korzystając z nitkowego wyzwalacza odległościowego. Przy dłuższych profilach, podczas pomiarów w stałym interwale czasu, niezbędne jest korzystanie z systemu GPS. Większą dokładność pozycjonowania zapewnia oczywiście GPS różnicowy (DGPS). GPS komunikuje się z komputerem sterującym pracą georadaru przez port szeregowy (w przypadku georadarów produkowanych przez firmę Mala GeoScience) lub port szeregowy georadaru w przypadku produktów amerykańskiej firmy GSSI (np. SIR-3000). Dane z systemu GPS są eksportowane zgodnie z protokołem NMEA (NMEA 0183) lub TSIP. NMEA (National Marine Electronics Association) oznacza międzynarodowy standard transmisji danych GPS wykorzystywany przede wszystkim w zastosowaniach morskich. TSIP (Trimble Standard Interface Protocol) oznacza binarny protokół opracowany przez firmę Trimble Navigation.

Program odbiera dane geodezyjne nieprzerwanie, ale zapis współrzędnych realizowany jest w sposób uporządkowany i odbywa się tylko w momentach zapisu tras georadarowych. W tym wypadku współrzędnych jest tyle, ile tras na zarejestrowanym profilu (Ortyl & Bałut 2006). W przypadku GPS niższej klasy i krótkiego interwału pomiędzy trasami możliwe jest zarejestrowanie większej ilości tras z dokładnie tą samą pozycją. Należy wtedy zmniejszyć częstotliwość odczytywania lokalizacji z systemu GPS. Niekiedy podczas odczytu współrzędnych każdej trasy powstają zakłócenia, korzystniej jest wtedy odczytywać współrzędne z systemu GPS co kilka tras i interpolować pozycję. Maksymalna częstotliwość wyznaczenia i przesyłu nowych współrzędnych w typowych systemach GPS do zastosowań geodezyjnych wynosi 10 Hz, wyjątkowo 20 Hz.

Dokładność wyznaczenia wysokości powierzchni pomiarowej ponad poziom odniesienia jest dwukrotnie mniejsza niż współrzędnych poziomych. Nie ma to jednak większego znaczenia przy wyznaczeniu głębokości dna zbiornika wodnego. Problemem może być natomiast falowanie wody podczas pomiaru (zwłaszcza na większych akwenach wodnych). Może to powodować błędy określania dokładnej głębokości, co można skorygować na etapie przetwarzania danych. Za pomocą specjalnych programów (np. programu GPS Mapper firmy Mala GeoScience) istnieje możliwość konwersji zinterpretowanych warstw osadów dennych i podłoża do programu Google Earth. Na mapę satelitarną dostępną w Google nakładane są linie pomiarowe; zmiana barwy linii odwzorowuje zmianę głębokości wyinterpretowanej granicy.

Do pomiarów osadów dennych płytkich zbiorników wodnych najlepiej predysponowane są anteny średnio- i niskoczęstotliwościowe (o częstotliwościach poniżej 250 MHz) – zarówno ekranowane, jak i nieekranowane. Dodatkowym problemem podczas pomiarów antenami niskoczęstotliwościowymi (np. 50 MHz) są ich duże rozmiary i konieczność rozsunęcia anten na niezbędną odległość. Konstruując pływającą platformę dla anten należy zwrócić uwagę na jak najmniejszą odległość pomiędzy antenami a powierzchnią wody. Korzystne jest używanie pontonów, w których antena leży bezpośrednio na ich dnie.

Do badania zbiorników nadają się również doskonale stosunkowo nowe anteny RTA o częstotliwościach 25, 50 i 100 MHz (produkcji Mala GeoScience). Są to anteny w postaci długiego kabla, gdzie dipole anteny nadawczej i odbiorczej są ułożone w jednej linii. Z oczywistych względów antena taka musi znajdować się w hermetycznej obudowie.

Podczas interpretacji pomiarów należy pamiętać, że prędkość fali elektromagnetycznej zasadniczo zmienia się z głębokością. Dla wody wynosi $v=3.3$ cm/ns, dla słabo skonsolidowanych osadów dennych jest ona niewiele większa, natomiast dla podłoża (zwłaszcza krystalicznego) może przekraczać $v=10$ cm/ns. Z uwagi na wysokie tłumienie fali elektromagnetycznej w wodzie, jeśli to tylko możliwe, należy maksymalnie zwiększyć moc nadajnika. W radarach firmy Sensors & Software realizuje się to poprzez zwiększenie napięcia nadajnika (najwyższe napięcie to 5000 V, w porównaniu do 400 V georadaru RAMAC/GPR). Z tych samych powodów można znacznie powiększyć składanie (sumowanie) sygnału.

PRZYKŁADY REJESTRACJI

W tej części pracy pokazano kilka przykładów rejestracji dokonanych na zbiornikach wodnych. Dla porównania, jako pierwszy przykład pokazano rejestrację wykonaną za pomocą sub-bottom profilera. Na figurze 1 przedstawiono echogram SBP zarejestrowany aparaturą 2400-DSS Deep Water Sub-Bottom System firmy Edge Tech (materiał pomiarowy otrzymany z firmy Edge Tech). Miąższość osadów dennych wynosi około 60 m. Rejestracja dokonana została na wodach Archipelagu Malajskiego w pobliżu Indonezji. Zwraca uwagę bardzo duży zasięg głębokościowy metody SBP i wysoka rozdzielczość.

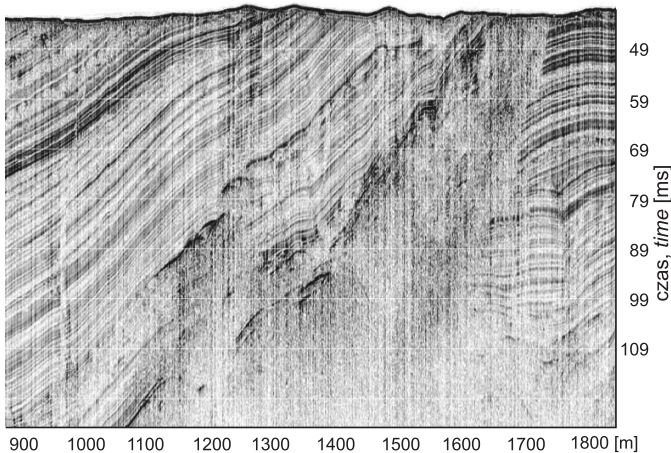


Fig. 1. Profilowanie SBP wykonane na wodach Archipelagu Malajskiego (za zgodą firmy EdgeTech).
Aparatura 2400-DSS Deep Water Sub-Bottom System

Fig. 1. SBP profiling at the Malay Archipelago sea (reproduced by permission of EdgeTech).
2400-DSS Deep Water Sub-Bottom System

Kolejne przykłady to już rejestracje georadarowe. Na figurze 2 pokazano echogram zarejestrowany na jeziorze Wigry. Pomiar wykonano po powierzchni wody georadarem RAMAC/GPR za pomocą anten o częstotliwości 200 MHz. Doskonale widoczne są osady kredy jeziornej. Dla porównania, na figurze 3 pokazano echogram zarejestrowany na jednym z jezior w pobliżu miejscowości Mala (Szwecja). Pomiary wykonano georadarem RAMAC/GPR za pomocą anten o częstotliwości 200 MHz (dane pomiarowe otrzymano dzie-

ki uprzejmości firmy Mala GeoScience). Na echogramie można wyróżnić osady dennie, jak również skonsolidowane podłoże. Zwraca uwagę duży zasięg metody georadarowej świadczący o bardzo dużej czystości wody (oporność wody dochodzi do 2000 omm).

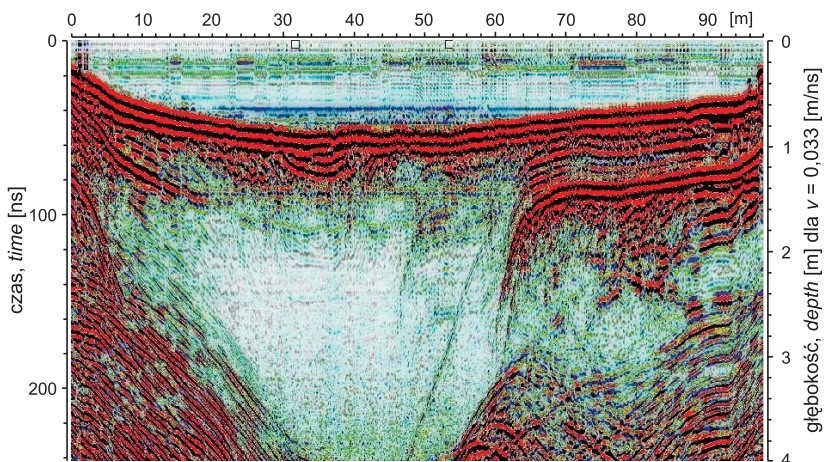


Fig. 2. Echogram georadarowy na jeziorze Wigry. Aparatura RAMAC/GPR, anteny nieekranowane 200 MHz

Fig. 2. GPR echogram recorded on the Wigry lake. RAMAC/GPR, unshielded antennae 200 MHz

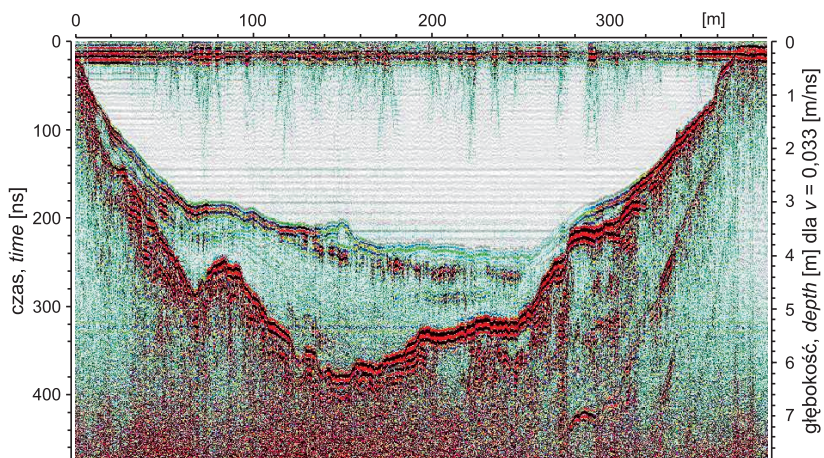


Fig. 3. Echogram georadarowy na jeziorze w Mala (Szwecja). Aparatura RAMAC/GPR, anteny nieekranowane 200 MHz (za zgodą firmy Mala GeoScience)

Fig. 3. GPR echogram recorded on the lake in Mala (Sweden). RAMAC/GPR, unshielded antennae 200 MHz (reproduced by permission of Mala GeoScience)

Na obszarze zbiorników wodnych metodę GPR można stosować również w celach geotechnicznych. Na figurze 4 pokazano echogram uzyskany na Wiśle poniżej zapory we Włocławku. Profil został wykonany prostopadłe do zapory, nad płytą wypadową. Rejestracji doko-

nano georadarem RAMAC/GPR za pomocą anten o częstotliwości 100 MHz. Wyraźnie widoczne są wymycia materiału pod płytami betonowymi, które w konsekwencji spowodowały ich zapadnięcie i rozwarstwienie.

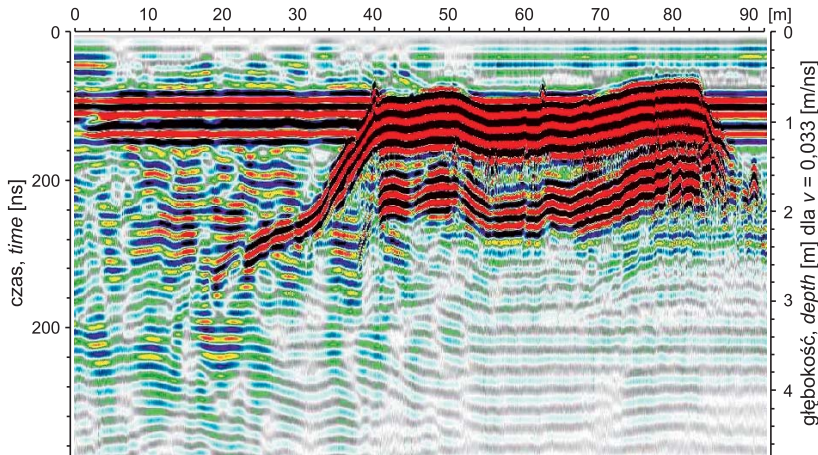


Fig. 4. Echogram georadarowy na Wiśle, poniżej zapory we Włocławku. Aparatura RAMAC/GPR, anteny ekranowane 100 MHz

Fig. 4. GPR echogram recorded on the Vistula river, below the dam in Włocławek. RAMAC/GPR, shielded antennae 100 MHz

WNIOSKI

Najlepszą metodą badania osadów dennych zbiorników wodnych jest SBP. Sub-bottom profiler (w przeciwieństwie do georadaru) działa równie skutecznie w wodach morskich. Georadar jest niezastąpiony do badania płytkich akwenów. Zasięg metody georadarowej maleje drastycznie ze wzrostem zanieczyszczenia i zmineralizowania wody. Metodą georadarową można wykonywać pomiary zimą, po powierzchni lodu (co w wypadku sub-bottom profilera jest niemożliwe). Podczas pomiarów na zbiornikach wodnych niezbędne jest stosowanie systemu GPS o dużej dokładności (DGPS) do lokalizacji tras na profilach.

Niniejszy artykuł został opublikowany w ramach prac statutowych nr 11.11.140.455 Katedry Geofizyki WGGiOŚ AGH w 2009 roku.

Praca była prezentowana na VII Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Geofizyka w geologii, górnictwie i ochronie środowiska” organizowanej z okazji jubileuszu 90-lecia AGH na WGGiOŚ.

LITERATURA

- Baumgart-Kotarba M., Kotarba A., Dec J. & Ślusarczyk R., 2003. Geomorfologiczne poznanie Tatr w świetle badań geofizycznych. *Przegląd Geograficzny*, 75, 4, 509–523.
- Chełmicki W., 2001. *Woda – zasoby, degradacja, ochrona*. PWN, Warszawa, 1–306.

- Chieh-Hou Yang, Jiunn-I You & Chiu-Pin Lin, 2002. Delineating Lake Bottom Structure by Resistivity Image Profiling on Water Surface. *TAO*, 13, 1, 39–52.
- Filina I.Y., Blankenship D.D., Lopamudra R., Mrinal K.S., Richter T.G. & Holt J.W., 2006. Inversion of Airborne Gravity Data Acquired over Subglacial Lakes in East Antarctica. W: Fütterer D.K., Damaske D., Kleinschmidt G., Miller H. & Tessensohn F. (eds), *Antarctica, Contributions to Global Earth Sciences*, Springer, Berlin, 129–133.
- Karczewski J., 2007. *Zarys metody georadarowej*. UWND AGH, Kraków, 1–246.
- Lin Y.T., Schuettpehl C.C., Wu C.H. & Fratta D., 2008. A combined acoustic and electromagnetic wave-based techniques for bathymetry and subbottom profiling in shallow waters. *Journal of Applied Geophysics*, In Press, Available Online, November.
- Macioszczyk A. & Dobrzyński D., 2002. *Hydrogeochemia – strefy aktywnej wymiany wód podziemnych*. PWN, Warszawa, 1–448.
- Ortyl Ł. & Bałut A., 2006. Application of RTK-GPS technique in the process of 3-D location of georadar profile traces. *Geodesy*, PAN Kraków, 42, 27–44.