
PRACE NAUKOWE GIG GÓRNICITWO I ŚRODOWISKO	RESEARCH REPORTS MINING AND ENVIRONMENT
Kwartalnik	Quarterly 3/2005

Grzegorz Mutke, Jacek Chodacki

ZASTOSOWANIE PŁYTKIEGO PROFILOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO DO ROZWIĄZYWANIA ZAGADNIĘŃ INŻYNIERSKICH I ŚRODOWISKOWYCH W PRZYPOWIERZCHNIOWYCH WARSTWACH PODŁOŻA

Streszczenie

Przedstawiono przykłady zastosowania profilowania elektromagnetycznego za pomocą konduktometru CM-031 w diagnostyce płytkiego podłoża – identyfikacja i lokalizacja podziemnej infrastruktury technicznej oraz zdeponowanych pod ziemią odpadów przemysłowych. Potwierdziły one, że badanie płytkiego podłoża nieinwazyjnymi metodami geofizycznymi jest korzystne zarówno ze względu na uzyskiwane informacje merytoryczne, jak i ze względów ekonomicznych. Dodatkową zaletą pomiarów konduktometrycznych jest krótki czas realizacji, mała pracochłonność, duża informatywność oraz technika pomiarowa niewymagająca bezpośredniego kontaktu urządzenia z podłożem. Wszystkie te elementy stanowią o dużej efektywności pomiarów konduktometrycznych, wykonywanych na dużych obszarach, w rozwiązywaniu zagadnień inżynierskich i środowiskowych.

Use of shallow electromagnetic prospecting to solving engineer and environmental problems in subsoil layers

Abstract

Examples of use of electromagnetic prospecting by means of conductometer CM-031 in diagnostics of subsoil identification and location of underground technical infrastructures and industrial waste materials deposited underground were presented. They confirmed that subsoil investigation with non-invasive geophysical methods is profitable both regarding obtained essential information, as well as from economic reasons. Additional advantage of conductometric measurements is short time of realization, low labour consumption, high informativity and measuring technique without requirement of immediate device contact with a base. All these elements determine high effectivity of conductometric measurements executed on wide areas in resolving engineer and environmental problems.

WPROWADZENIE

Metody geofizyczne mogą być z powodzeniem stosowane do rozwiązywania wielu zagadnień środowiskowych i inżynierskich występujących w warstwach podłoża. Ich dużą zaletą jest bezinwazyjna technika pomiarowa, możliwość wykonywania badań ciągłych na dużych obszarach (w odróżnieniu od punktowych pomiarów wykonywanych *in situ* w otworach wiertniczych), niskie koszty badań. Wadą pomiarów geofizycznych jest natomiast wyrażanie informacji o strukturze lub skażeniu gruntów w sposób pośredni przez podanie informacji w jednostkach badanego pola fizycznego. Skalowanie jednostek pola fizycznego na informację o strukturze geologicznej, niejednorodnościach w podłożu, znajdujących się obiektach lub charakterystyce skażenia gruntów jest bardzo ważne i w tym zakresie jest

wymagana odpowiednia wiedza i doświadczenie w zakresie interpretacji zdjęć terenowych.

Istnieje kilka różnych metod geofizycznych do badania płytkiego podłoża i procesów w nim zachodzących. Spośród metod najczęściej stosowanych należy wyróżnić:

- metodę elektrooporową, stosowaną najczęściej w odmianie profilowania elektrooporowego, sondowania elektrooporowego lub tomografii elektrooporowej,
- metodę sejsmiczną, stosowaną w formie profilowania sejsmicznego, zdjęcia tomograficznego oraz badania fal powierzchniowych (technika MASW),
- metodę radarową,
- metodę elektromagnetyczną stosowaną w wersji profilowania lub sondowania,
- metodę grawimetryczną.

W niniejszym artykule przedstawiono metodę płytkiego profilowania elektromagnetycznego, z wykorzystaniem do pomiarów konduktometru CM-031. Taki konduktometr został zakupiony w GIG w 2004 roku. Każda z wymienionych wyżej metod geofizycznych charakteryzuje się własnymi preferencjami w rozwiązywaniu poszczególnych problemów. Metoda elektromagnetyczna w wersji płytkich profilowań szczególnie dobre wyniki daje przy rozwiązywaniu następujących zagadnień:

- wykrywanie obiektów znajdujących się w ziemi (złom, kable, rurociągi, zbiorniki, amunicja itp.),
- badanie zagrożenia ekologicznego w miejscach składowania odpadów,
- lokalizacja niejednorodności i obiektów antropogenicznych w podłożu,
- badanie skażeń wód gruntowych i gleb substancjami chemicznymi oraz monitoring migracji tych zanieczyszczeń,
- wykrywanie uskoków i spękań w płytkim podłożu,
- badania dla celów archeologicznych.

Niektóre z wyżej wymienionych zagadnień mogą być i są rozwiązywane również innymi metodami geofizycznymi, jednak to właśnie metoda profilowania elektromagnetycznego posiada niezaprzeczalne zalety do wykonywania tych zadań. Zawiera w sobie informacje o dwóch polach geofizycznych (elektrycznym i magnetycznym), jest metodą bardzo wydajną i mało pracochłonną, a pomiary nie wymagają kontaktu aparatury z podłożem. Ten ostatni element w szczególności korzystnie odróżnia tę metodę od pozostałych. Ma on duże znaczenie w trudnym terenie i przy niekorzystnych warunkach pogodowych.

Badania geofizyczne są w Polsce stosunkowo mało popularne i mniej powszechnie stosowane niż w innych krajach europejskich, nie wspominając już o USA czy Kanadzie. Zmiana tego stanu wymaga przekonania potencjalnych odbiorców usług, o dużej użyteczności pomiarów geofizycznych i niskich nakładach na ich realizację. W przeciwieństwie do geologicznych badań inżynierskich i analiz geochemicznych w otworach, dostarczana informacja nie jest punktowa i pozwala na ciągle rozpoznanie obszarów o dużej zmienności i niejednorodności.

Bardzo istotny jest problem współpracy i skalowania informacji geofizycznych z punktowymi informacjami z wierceń i oznaczeń geochemicznych. Nie zawsze ten oczywisty sposób łączenia informacji o podłożu jest stosowany przez geofizyków.

Z drugiej strony geolodzy niezbyt często sięgają do pomiarów geofizycznych jako narzędzia do rozwiązywania zagadnień inżynierskich i środowiskowych, mających miejsce w warstwach przypowierzchniowych. Dalszy rozwój obustronnej współpracy z pewnością mogłby przynieść bardzo pozytywne efekty i duże korzyści.

1. PODSTAWY MATEMATYCZNO-FIZYCZNE METODY ELEKTROMAGNETYCZNEJ I CHARAKTERYSTYKA URZĄDZENIA

Konduktometr elektromagnetyczny jest urządzeniem, którego zasada działania, jak zresztą wszystkich metod geoelektrycznych i elektromagnetycznych, bazuje na czterech równaniach Maxwella. Konduktometr składa się z dwóch cewek, między którymi odległość wynosi s . Jedna z cewek jest cewką nadawczą a druga odbiorczą. W cewce nadawczej jest wytwarzany prąd o niskiej częstotliwości, który generuje zmienne pole magnetyczne H_p . Tak wytworzone pierwotne pole magnetyczne wnika do ośrodka skalnego powodując w nim wtórną indukcję magnetyczną wytworzoną przez prądy wirowe. Wtórne pole magnetyczne wygenerowane w ośrodku zostaje zmierzone w cewce odbiorczej również na zasadzie indukcji magnetycznej, powodując płynięcie w niej prądu. Z konstrukcji konduktometru oraz z równań Maxwella wynika prosta zależność między przewodnością wzbudzonego magnetycznie ośrodka a natężeniami pola magnetycznego wytworzonego w cewce nadawczej H_p i pomierzonego w cewce odbiorczej wtórnego pola magnetycznego H_s

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \frac{H_s}{H_p} \quad (1)$$

gdzie:

- σ_a – pozorna przewodność właściwa ośrodka objętego badaniem,
- H_p – amplituda natężenia pola w cewce nadawczej,
- H_s – amplituda natężenia pola w cewce odbiorczej,
- ω – częstość kołowa prądu w cewce nadawczej,
- μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni,
- s – odległość między środkiem cewki nadawczej i odbiorczej.

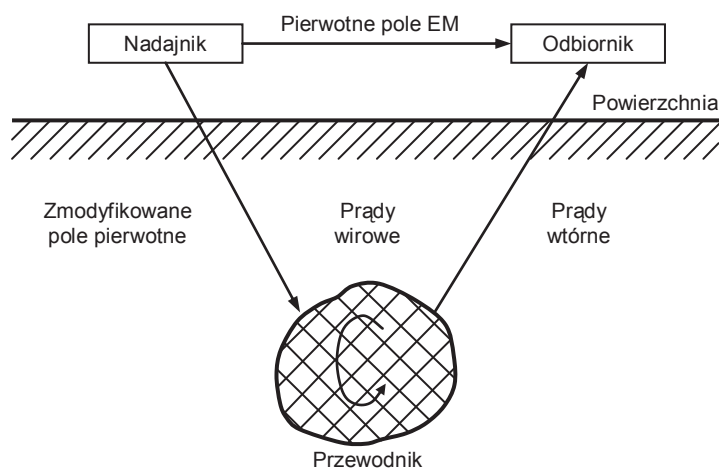
Konduktometr CM-031 (fot. 1) jest aparaturą służącą do wykonywania dipolowych płytkich profilowań elektromagnetycznych. Jest urządzeniem pracującym w domenie częstotliwości, tzn. prąd zmienny o określonej częstotliwości, płynący w cewce nadawczej, wzbudza wtórne pole magnetyczne w ośrodku. W omawianym przyrządzie częstotliwość prądu wynosi 9,766 kHz. Odległość między anteną nadawczą i odbiorczą wynosi 374 cm, co pozwala na wykonywanie profilowań do głębokości 6 m. Wielkościami mierzonymi są oporność (lub przewodność) elektryczna gruntu i składnik *inphase*. Oporność elektryczna określa odpowiedź ośrodka na płynący w nim prąd. Natomiast zdefiniowanie składnika *inphase* nie jest tak proste. Generalnie jest to wielkość względna, wykalibrowana w jednostkach bezwymiarowych. Jej wartość jest proporcjonalna do rzeczywistej części wtórnego pola magnetycznego, przy czym nie jest to relacja liniowa i zależy również od przenikalności

magnetycznej ośrodka. W wielu przypadkach jej pomiar jest bardzo użyteczny, gdyż jest to wskaźnik obecności podziemnych obiektów z metalu. Na rysunku 1 przedstawiono poglądowo zasadę funkcjonowania metody profilowania elektromagnetycznego przy użyciu konduktometru CM-031.



Fot. 1. Konduktometr CM-031

Foto. 1. Conductometer CM-031



Rys. 1. Ogólny schemat pomiarów elektromagnetycznych

Fig. 1. General layout of electromagnetic measurements

Dzięki swej konstrukcji konduktometr elektromagnetyczny CM-031 ma zdecydowaną przewagę nad innymi urządzeniami tego typu, gdyż w trakcie pomiaru nie jest wymagany bezpośredni kontakt z badanym ośrodkiem, a więc urządzenie może być stosowane w pewnej odległości od badanych obiektów.

Zakres pomiarowy aparatury dla przewodności pozornej gruntu wynosi od 0,1 do 1000 mS/m (oporności od 1 do 10 000 Ω m), natomiast dla składnika *inphase* od 1 do 4000 jednostek. Rozdzielczość pomiaru to odpowiednio 0,1 mS/m (0,1 Ω m) i 1. Kontrola pomiaru odbywa się poprzez wbudowany komputer PC Palmtop HP 200XL.

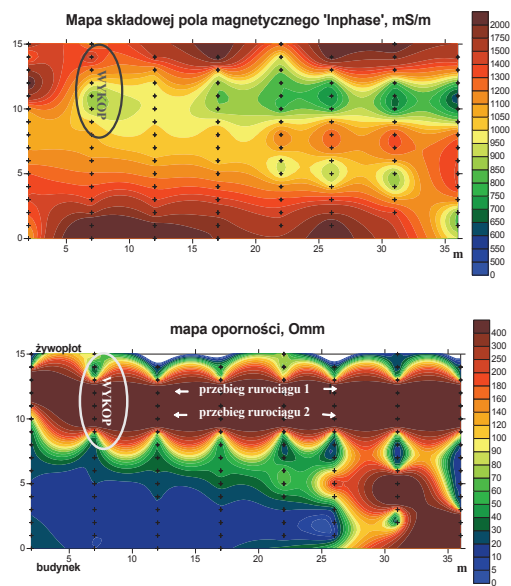
2. PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA PŁYTKIEGO PROFILOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO DO WYKRYWANIA OBIEKTÓW INFRASTRUKTURY PODZIEMNEJ

Na terenach pogórnicznych i górniczych, a szerzej na terenach przemysłowych lub dawnych baz wojskowych, często spotykamy się z problemem zakopanych

w ziemi elementów złomu (np. zbiorniki, beczki z odpadami, kable, zużyty sprzęt itp.) lub starej liniowej infrastruktury technicznej, nie zawsze dobrze udokumentowanej na dostępnych mapach. Informacja o występowaniu i lokalizacji takich elementów znajdujących się w ziemi jest niezbędna przy planowaniu i wykonywaniu w terenie nowych inwestycji. Stare zbiorniki paliw, czy inny zakopany w ziemi złom, stanowią zagrożenie dla terenu, mogące się objawiać skażeniem gleby i wód przypowierzchniowych. Rozwój infrastruktury naziemnej i podziemnej miast (np. budowa parkingów) będzie wymagał szybkiej i precyzyjnej informacji o obiektach, kablach i rurociągach zakopanych w ziemi. Wspomniane zagadnienia mogą być badane metodami elektrooporowymi, radarowymi oraz elektromagnetycznymi. Jak już wspomniano wcześniej, bardzo dobre wyniki (przy małej czasochłonności prac w terenie) dla zakresu tego rodzaju badań, uzyskuje się stosując metodę elektromagnetyczną. Metoda ta w wersji profilowania elektromagnetycznego wykorzystuje informacje o pozornej przewodności lub oporności ośrodka i składowej proporcjonalnej do wtórnego pola magnetycznego, tzw. składnik *inphase*.

Pomiary wykonano metodą płytkiego profilowania elektromagnetycznego, np. w celu potwierdzenia rzeczywistej lokalizacji podziemnej sieci infrastruktury liniowej w terenie, w którym planowano wybudować parking. Informacja ta była potrzebna wykonawcy do odpowiedniej organizacji prac, niekolidujących z podziemnymi mediami.

Wyniki badań konduktometrem wskazały na istnienie bardzo silnej i wyraźnej anomalii wysokooporowej w miejscu przebiegu dwóch rurociągów równoległych do siebie (rys. 2). Informacja o przebiegu tych rurociągów została potwierdzona po wykonaniu wykopu. Na zdjęciu (fot. 2) widoczne są dwa rurociągi. Pierwszy biegnie około 2 m od linii żywopłotu, a drugi nieco głębiej, posadowiony około 2 m za pierwszym. Ponieważ rurociągi biegną równoległe blisko siebie, to powstałe anomalie połączyły się w jeden pas rozciągający się wzdłuż badanego obszaru (pomiaru odczytywane były co 1 m). Niewielka anomalia niższych wartości składowej rzeczywistej wtórnego pola magnetycznego może wskazywać, że przynajmniej jeden z rurociągów jest żeliwny.



Rys. 2. Mapa oporności pozornej i składowej pola magnetycznego w rejonie badań. Na mapie oporności jest widoczna anomalia wzdłuż linii biegu dwóch rurociągów

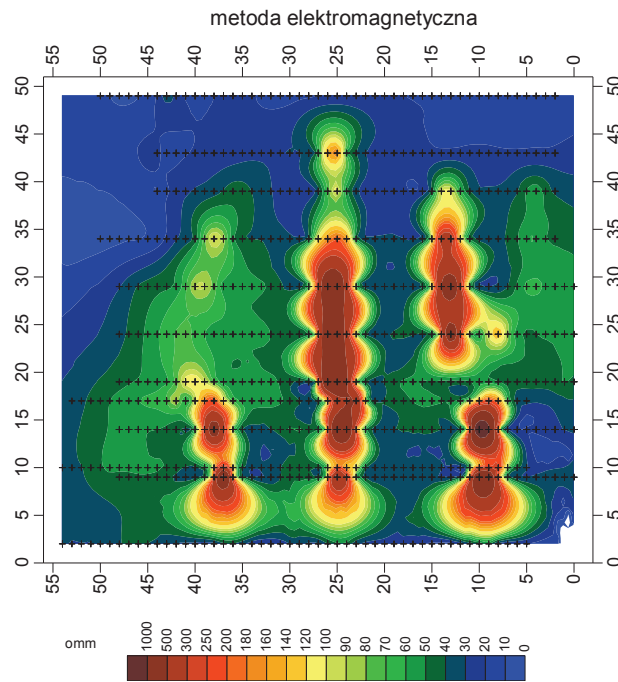
Fig. 2. A map of apparent resistance and magnetic field component in region of investigations. There is visible an anomaly along line of two pipelines in the map of resistance



Fot. 2. Wykop wykonany od strony żywopłotu – dwie rury w miejscu występowania anomalii wysokooporowej

Photo. 2. Excavation executed from the side of hedgerow – two pipes in place of occurrence of high-resistance anomaly

Kolejny zweryfikowany obraz przebiegu liniowych obiektów infrastruktury podziemnej pokazano na rysunku 3. Poszukiwano w terenie przebiegu rurociągów. Prace wykonywano jesienią (fot. 3b). Zdjęcie wykonane zimą (fot. 3a) pokazuje, że środkowa, największa anomalia oporności pokrywa się z przebiegiem kanalizacji, widocznej na zdjęciu jako ślad wytopionego śniegu wzdłuż placu. Pozostałe dwie strefy wysokooporowe, wskazują swym kształtem na lokalizację kolejnych obiektów liniowych.



Rys. 3. Wyniki pomiarów elektromagnetycznych
Fig. 3. Results of electromagnetic measurements

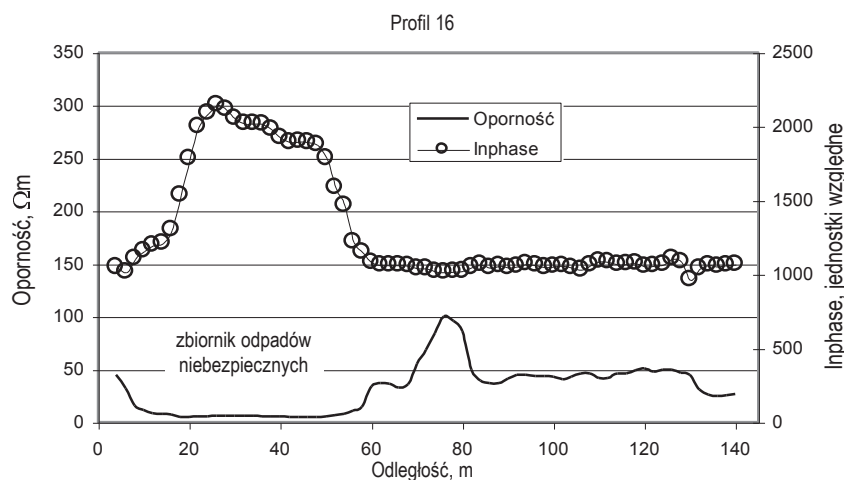


Fot. 3. Pomiary elektromagnetyczne za pomocą aparatury CM-03 przeprowadzane jesienią (a) i widok zimą największej anomalii oporności (b)
Foto. 3. Electromagnetic measurements by means of apparatus CM-03 conducted in autumn (a) and winter view of greatest resistance anomaly (b)

Zaprezentowane przykłady pomiarowe dowodzą, że metoda płytkich profilowań elektromagnetycznych bardzo dobrze zdaje egzamin przy ustalaniu lokalizacji i przebiegu podziemnych obiektów infrastruktury technicznej.

3. PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA PŁYTKIEGO PROFILOWANIA ELEKTROMAGNETYCZNEGO DO WYKRYWANIA ODPADÓW PRZEMYSŁOWYCH SKŁADOWANYCH W ZIEMI

Testowe badania elektromagnetyczne zostały wykonane na terenie zakładu przemysłowego. Celem badań było przetestowanie czułości konduktometru przy badaniu identyfikacji składowanych odpadów i wyznaczaniu obszarów o płytkim poziomie wód gruntowych (do 5 m). Wytyczono profil, który przecinał zbiornik odpadów niebezpiecznych z lat 80. zeszłego wieku. Deponowano tam odpady w beczkach, innych pojemnikach lub luzem, w tym: szlam z elektrolizy rtęciowej, błoto z produkcji żelazocyjanku potasu, opakowania, osady z oczyszczalni ścieków, zestalony ściek glinowy, odpadowa krzemionka. Zbiorcza informacja z pomiarów konduktometrycznych obejmowała wzdłuż profilu głębokość 5–6 m. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 4. Bezpośrednio nad zbiornikiem odpadów zarejestrowano najniższe wartości oporności pozornej (kilka Ωm). W tym samym miejscu wystąpiła dodatnia anomalia rzeczywistej części wtórnego pola magnetycznego *inphase* (wzrost o 100%). Wyniki te wskazują, że metoda płytkich profilowań elektromagnetycznych doskonale nadaje się do szybkiego wykrywania i okonturowania obszarów odpadów przemysłowych składowanych w ziemi. Oczywiście w przypadku, gdy chcemy dokładnie określić zasięg głębokościowy składowiska, należy w tym miejscu dodatkowo wykonać sondowania geofizyczne (np. elektromagnetyczne, geoelektryczne itp.).

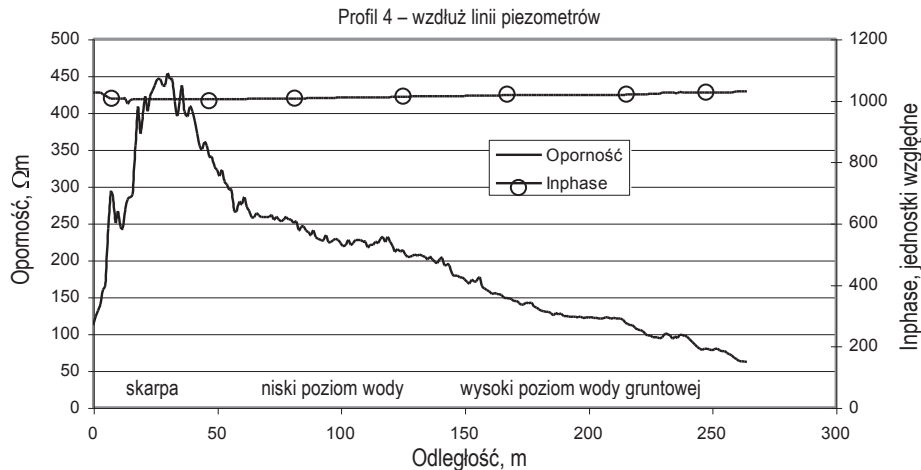


Rys. 4. Pomiary elektromagnetyczne wzdłuż profilu XVI nad zbiornikiem odpadów niebezpiecznych

Fig. 4. Electromagnetic measurements along logging XVI over reservoir of dangerous waste material

Przykład pomiarów konduktometrycznych, wskazujących na występowanie wody na głębokości do 6 m przedstawiono na rysunku 5. Pod koniec profilu IV (200–270 m) oporność pozorna wyraźnie maleje – do $50 \Omega\text{m}$, co ma związek z obecnością wody (piezometry wykazały w tym rejonie najniższe położenie wód gruntowych, 2,7–4,3 m). Początek profilu IV to schodzenie ze skarpy, gdzie zarejestrowano najwyższe wartości

oporności pozornej charakterystycznej dla suchych piasków – 450 Ωm . W środkowej części profilu IV (tj. część poza skarpią oraz przy głębokim poziomie wód gruntowych, powyżej 6 m), oporność pozorna oscyluje w granicach 150–250 Ωm . Natomiast wysoki poziom wód gruntowych obrazuje niskie wartości oporności pozornej (50–100 Ωm).



Rys. 5. Pomiary elektromagnetyczne na profilu IV wzdłuż linii piezometrów

Fig. 5. Electromagnetic measurements on logging IV along a line of piezometers

PODSUMOWANIE

Metody geofizyczne mogą być stosowane do rozwiązania bardzo wielu zagadnień środowiskowych. Ich zaletą jest możliwość wykonywania pomiarów bezinwazyjnych w warunkach *in situ* oraz niskie koszty badań w porównaniu z badaniami w otworach wiertniczych. Współpraca geologów i geofizyków prowadzi do uzyskania optymalnej informacji o terenie, przy rozpoznawaniu zagrożeń środowiskowych i zagadnień geotechnicznych. Wyniki oznaczeń z odwiertów oraz wyniki analiz geochemicznych mogą służyć do skalowania wskazań pola geofizycznego (np. elektrycznego lub magnetycznego) oraz do weryfikacji miejsc istotnych zagrożeń, zlokalizowanych w terenie za pomocą badań geofizycznych. Wydaje się, że taki kierunek rozwoju badań w terenie będzie dominował w przyszłości. Niestety, w porównaniu z krajami Europy Zachodniej oraz USA, w Polsce wykorzystanie metod geofizycznych do badań środowiskowych, geotechnicznych i inżynierskich jest bardzo małe.

Przedstawione przykłady zastosowania profilowania elektromagnetycznego konduktometrem CM-031 do diagnostyki płytkiego podłoża, w aspekcie identyfikacji i lokalizacji podziemnej infrastruktury technicznej oraz okonturowania zdeponowanych pod ziemią odpadów przemysłowych potwierdzają zalety tej techniki pomiarowej.

Poza przedstawionymi przykładami pomiarowymi, metoda konduktometryczna bardzo dobrze sprawdza się również w innej problematyce związanej z diagnostyką płytkiego podłoża. Oprócz typowego zastosowania do rozpoznawania płytkiej budowy

geologicznej, tj. określenia stref występowania utworów przepuszczalnych (piaski, żwiry) i nieprzepuszczalnych (iły, gliny), stref uskokowych, stref spękanych itp., posiada również możliwość detekcji podziemnych obiektów metalowych. Ze względu na swoją dużą wydajność, dobrze zdaje egzamin w badaniu stanu skarp i obwałowań przeciwpowodziowych. Ciekawe wyniki zastosowania pomiarów konduktometrycznych uzyskiwano również w badaniach archeologicznych.

Literatura

1. Dokumentacja GF-Instruments 2001: Conductivity Meter CM-031.
2. Geonics Limited Technical Note TN-5 (1980). Electrical Conductivity of Soils and Rocks. Geonics Limited, #8, 1745 Meyerside Dr., Mississauga, Ont., L5T 1C6.
3. Geonics Limited Technical Note TN-6 (1980): Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers. Geonics Limited, #8, 1745 Meyerside Dr., Mississauga, Ont., L5T 1C6.
4. Kauffman A.A., Keller G.V. (1983): *Frequency and transient soundings*. N.Y., Elsevier.
5. Kotyrba A. (2001): *Ocena i zrównoważone odzyskiwanie terenów górniczych do pogórniczego wykorzystania*. Projekt Badawczy Europejskiej Wspólnoty Węgla i Stali nr PR-095. Sprawozdanie z projektu. Bruksela, RFSC.
6. Mutke G. i inni (2004): *Identyfikacja obszarów zanieczyszczonych skażonymi wodami gruntowymi oraz płytko zalegającymi niejednorodnościami podłoża*. Dokumentacja pracy badawczej GIG nr 19300204-120.
7. Thiel K. (1980): *Mechanika skał w inżynierii wodnej*. Warszawa, PKWN.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Józef Dubiński