

ZASTOSOWANIE METOD GEOFIZYCZNYCH W BADANIACH KATASTROF LOTNICZYCH

Andrzej Ossowski¹, Bernadetta Pasierb²

Abstract

Geophysics is the science that studies the processes and phenomena occurring in the Earth interior, lithosphere, hydrosphere and atmosphere. The study of soil properties and shallow rock deposits is a subject of the engineering geophysics.

Geophysical methods allow precise identification of near-surface zone, being the most vulnerable to changes caused by human activities. Range of geophysical research reaches the depth from several to hundred meters. They use the law and the rules of physics, and the purpose of their use is to assess the diversity of physical properties of the geological medium. Geophysical methods are used comprehensively in order to solve diverse thematic issues, such as: ground properties recognition for needs of geological and engineering, environmental monitoring, as well as anthropogenic objects detecting. Because of the ability to perform measurements along the profiles of any length, interpretive possibilities in 2D and 3D geometry and also accuracy of geological medium mapping, the most versatile geophysical methods comprise: GPR, resistivity tomography, electromagnetic as well as magnetic and seismic. Physical basis of the methods used, measurement procedures, their advantages and disadvantages and application, as well as their use in context associated with the destruction of the plane TU-154M in Smolensk on 10.04.2010, have been briefly discussed in the present study.

Keywords - airplane, crash, geophysics, Smolensk

Streszczenie

Geofizyka jest nauką zajmującą się badaniem procesów i zjawisk fizycznych, które zachodzą we wnętrzu Ziemi, litosferze, hydrosferze i atmosferze. Badaniem własności gruntów i płytko zalegających skał będących miejscami ingerencji człowieka zajmuje się geofizyka inżynierska.

Metody geofizyki inżynierskiej pozwalają na precyzyjne rozpoznawanie strefy przypowierzchniowej, najbardziej narażonej na zmiany spowodowane działalnością człowieka. Zakres głębokościowy badań geofizycznych to kilka do kilkuset metrów. Wykorzystują prawa i zasady fizyki, a celem ich zastosowania jest ocena zróżnicowania własności fizycznych ośrodka geologicznego. Metody geofizyczne stosowane są kompleksowo w rozwiązywaniu zróżnicowanych zagadnień tematycznych: od rozpoznania podłoża dla celów geologiczno-inżynierskich, monitoringu środowiska, aż do detekcji obiektów antropogenicznych. Z pośród dużej różnorodności metod geofizyki inżynierskiej, ze względu na możliwość wykonywania pomiarów wzdłuż profili o dowolnej długości, możliwości interpretacyjne w geometrii 2D i 3D, a także ze względu na dokładność odwzorowania ośrodka najbardziej uniwersalne są metody geofizyczne: georadarowa, tomografia elektrooporowa, konduktometryczna, magnetometryczna i sejsmiczna. W artykule zostaną omówione podstawy fizyczne w/w metod, procedury pomiarowe, ich wady i zalety oraz zastosowania,

a także przedstawione są możliwości ich wykorzystania w aspekcie związanym ze zniszczeniem samolotu TU-154M w Smoleńsku w dniu 10.04.2010

Słowa kluczowe – geofizyka, katastrofa, samolot, Smoleńsk

1. METODA ELEKTROOPOROWA

1.1. Podstawy fizyczne metody

Metody elektrooporowe należą do grupy metod badających zmiany pola elektrycznego spowodowane niejednorodnością ośrodka skalnego. Pole to jest wytwarzane sztucznie przez układ elektrod zasilanych prądem stałym lub stacjonarnym. Przedmiotem rozpoznania jest przestrzeń ośrodka geologicznego pomiędzy dwiema elektrodami prądowymi uziemianymi w gruncie, do których podłączone jest źródło prądu elektrycznego Rys. 1. Przepływ prądu w badanym ośrodku oraz mierzony spadek potencjału rejestrowany dwoma elektrodami pomiarowymi jest zmienny w różnych fragmentach ośrodka i zależy od zmiany oporności elektrycznej ρ [Ωm], związanej z budową geologiczną i obecnością obiektów anomalnych. Wartość oporności ośrodka gruntowego, znajdującego się w obrębie wytworzonego pola elektrycznego wyznacza się na podstawie pomiaru natężenia prądu i napięcia między elektrodami pomiarowymi zgodnie z prawem Ohma. Wyznaczona oporność elektryczna określana jest terminem oporności pozornej i wyraża się wzorem

$$\rho_a = k \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

gdzie:

ρ_a - oporność elektryczna [Ωm],

ΔV - różnica potencjałów pomiędzy elektrodami pomiarowymi [V],

I - natężenie prądu emitowanego w podłoże [A],

k - współczynnik geometryczny układu pomiarowego [m]

Elektrody umieszczone są w różnych konfiguracjach w zależności od charakteru pomiarów i własności badanego ośrodka. Wybór układu uzależniony jest od rodzaju i kształtu badanej struktury, spodziewanego kontrastu oporności, charakterystyki posiadanego miernika oraz poziomu występujących w danym obszarze zakłóceń.

Metoda tomografii elektrooporowej stanowi połączenie profilowania i sondowania elektrooporowego. Seria ciągłych pomiarów wykonywana jest na podstawie automatycznego doboru kombinacji układu elektrod, spośród wszystkich podłączonych do kabla wzdłuż profilu

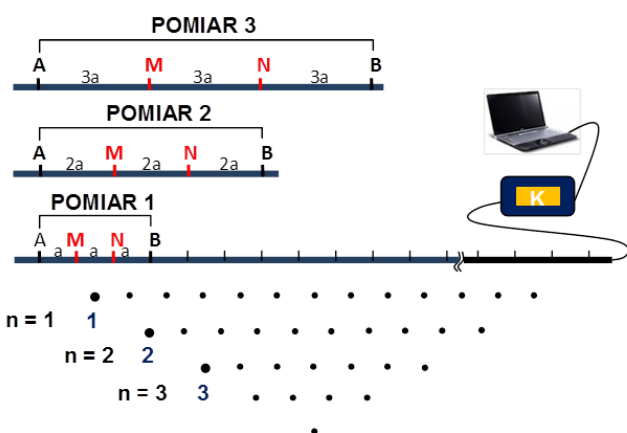
1) mgr inż. Andrzej Ossowski, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Geofizyki – emeryt, (e-mail: ossowski@geol.agh.edu.pl)

2) dr inż. Bernadetta Pasierb, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska (e-mail: bettka@pk.edu.pl)

Rys. 2. Pomiary odbywają się na całej długości profilu w jednym procesie kontrolowanym przez aparaturę pomiarową aż do wyczerpania wszystkich możliwych kombinacji elektrod pomiarowych i prądowych. Maksymalny rozstaw układu pomiarowego uzależniony jest od długości profilu i przekłada się na zasięg głębokościowy badań, im dłuższy rozstaw tym większy zasięg.



Rys. 1. Układ pomiarowy Schlumbergera [1].



Rys. 2. Sekwencja pomiarów: A,B – elektrody prądowe, M,N – elektrody potencjalowe, a – odległość pomiędzy elektrodami, n – poziom zasięgu układu pomiarowego odpowiadający n-krotności odstępów pomiędzy elektrodami [1].

Interpretację danych przeprowadza się w oparciu o algorytmy inwersyjne, narzucając warunki na poszukiwany model opornościowy ośrodka mające ograniczyć wieloznaczności rozwiązań. Rozwiązanie jest aproksymowane aż do osiągnięcia w kolejnych iteracjach minimalizacji błędu dopasowania parametrów modelu do parametrów pomierzonych.

Metodą tomografii elektrooporowej można otrzymać dwuwymiarowy 2D lub trójwymiarowy 3D obraz rozkładu oporności elektrycznej ośrodka w badanym obszarze. Dobór metodyki i konkretnej techniki pomiarowej zależy od lokalnej budowy geologicznej badanego obiektu i jego położenia w przestrzeni oraz od planowanych prac.

1.2. Zalety i ograniczenia metody

Metoda elektrooporowa charakteryzuje się [1]:

- dużą szczegółowością pomiarów, pozwalającą na śledzenie zmian oporności elektrycznej ośrodka zarówno w kierunku pionowym jak i poziomym,
- uzyskanie ciągłego niejednorodnego obrazu badanego ośrodka zarówno w geometrii dwuwymiarowej jak i trójwymiarowej,
- możliwością wydzielenie warstw nawet o miąższości kilku centymetrów, umożliwia uzyskanie czytelnych rejestracji w badaniach prowadzonych w ośrodkach o

niskiej oporności elektrycznej - zawierających duże ilości gliny, ilów, mułów w których np. metoda georadarowa jest znacznie ograniczona, obecność obiektów metalowych występujących ponad podłożem nie ogranicza jej skuteczności detekcji w porównaniu z metodami elektromagnetycznymi i metodą magnetyczną, na wynik wpływ mają warunki geologiczne, wilgotność warstw przypowierzchniowych, rozmiary i właściwości fizyczne poszukiwanych obiektów.

1.3. Zastosowania metody

1.3.1. Ogólne zasady tomografii elektrooporowej

Metoda tomografii elektrooporowej ERT (ang. *Electrical Resistivity Tomography*) jest jedną z bardziej popularnych metod geofizycznych dzięki rozwiązywaniu zróżnicowanych zagadnień tematycznych, dokładności odwzorowania ośrodka oraz możliwości stosowania w najróżniejszych warunkach terenowych. Wykorzystywana jest w badaniach geotechnicznych i hydrotechnicznych do określania stanu technicznego obwałowań rzecznych i budowli ziemnych oraz do lokalizowania zapadlak i pustek. Polecana jest w badaniach hydrogeologicznych do wykrywania warstw wodonośnych i zasięgu rozprzestrzenienia wód zmineralizowanych w ośrodku skalnym [1]. Szczególnie efektywna jest w silnie przewodzących ośrodkach, np. w obszarach o gliniastych gruntach, gdzie inne metody geofizyczne są nieprzydatne. W badaniach środowiskowych metoda tomografii elektrooporowej bardzo skuteczna jest w lokalizacji źródeł zanieczyszczeń i dróg ich migracji, kartowaniu aureoli skażeń wokół potencjalnych źródeł związanych ze składowiskiem odpadów, oczyszczalnią ścieków, zbiornikami paliw i zanieczyszczeń gruntu metalami ciężkimi. Metodą tomografii elektrooporowej można prowadzić monitoring migracji i dynamiki zmian skażeń. Odgrywa również znaczną rolę w detekcji podziemnych obiektów antropogenicznych, planowaniu i analizie prospekcji archeologicznej. Pozwala ukierunkować prace wykopaliskowe poprzez lokalizację nawarstwień kulturowych i identyfikację podziemnych pozostałości architektonicznych.

1.3.2. Lokalizacja rury odwadniającej

Metodą tomografii elektrooporowej zastosowano, jako metodę umożliwiającą rozpoznanie budowy geologicznej podłoża. Wykorzystano ją również w celu wykrycia podziemnych obiektów antropogenicznych.

Wyniki interpretacji przedstawiono w formie dwuwymiarowy obrazów opornościowych ośrodka odzwierciedlających budowę geologiczną obszaru [2]. W strefie przypowierzchniowej na badanym obszarze stwierdzono występowanie lessów i glin pylastych o miąższości rosnącej od 2 do 15 m w stronę części północnej terenu. Rys. 3.

Niższą warstwę stanowią szare ły o zmniejszającej się miąższości od około 20 m w części północnej, do 5 m na południu. ły szare podścielone są warstwą piasków brunatno – brązowych o miąższości około 5 – 7 m.

Przebieg tej warstwy odwzorowuje strop podłoża. W podłożu występują skały węglanowe, wapienie i wapienie margliste o nieregularnej rzeźbie stropu. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono również

występowanie anomalii o wartościach oporności rzeczywistej znacznie wyższych od otoczenia. Anomalia zaznacza się na głębokości około 7 m w obrębie silnie zawodnionej warstwy szarych ilów. Charakterystyczny, regularny, cylindryczny kształt anomalii sugeruje jej antropogeniczne pochodzenie.

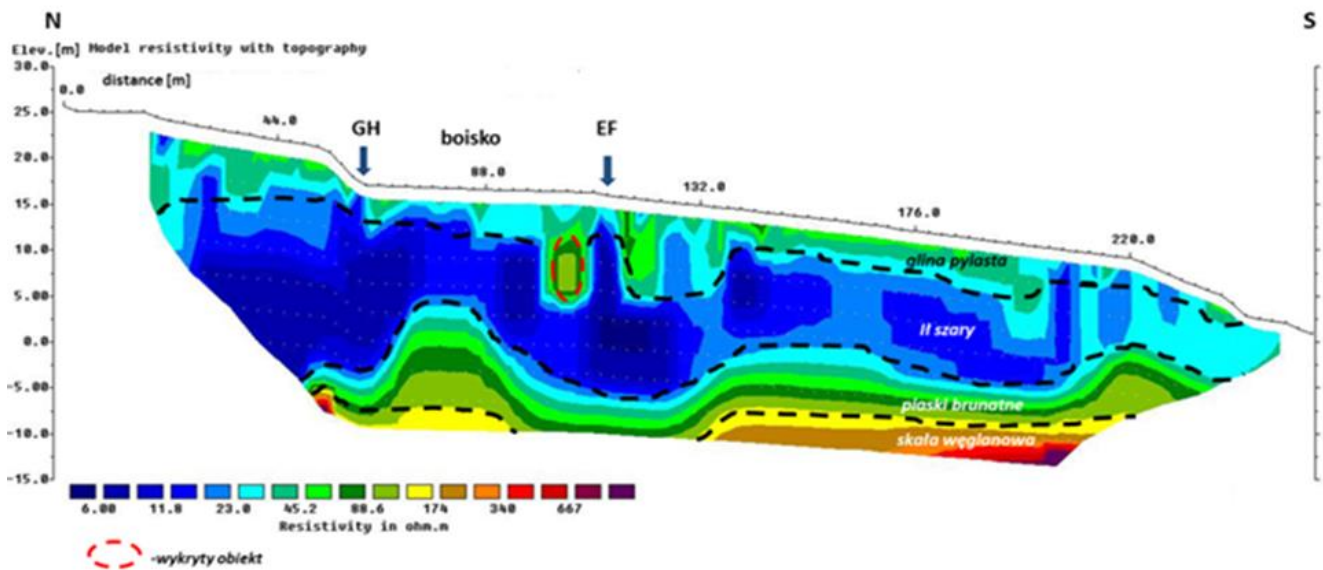
1.3.3. Określanie skupisk odpadów zalegających w gruncie

Metodą tomografii elektrooporowej rozpoznano budowę podłoża. Warstwę przypowierzchniową stanowi humus o miąższości około 0,5 metra Rys. 4.

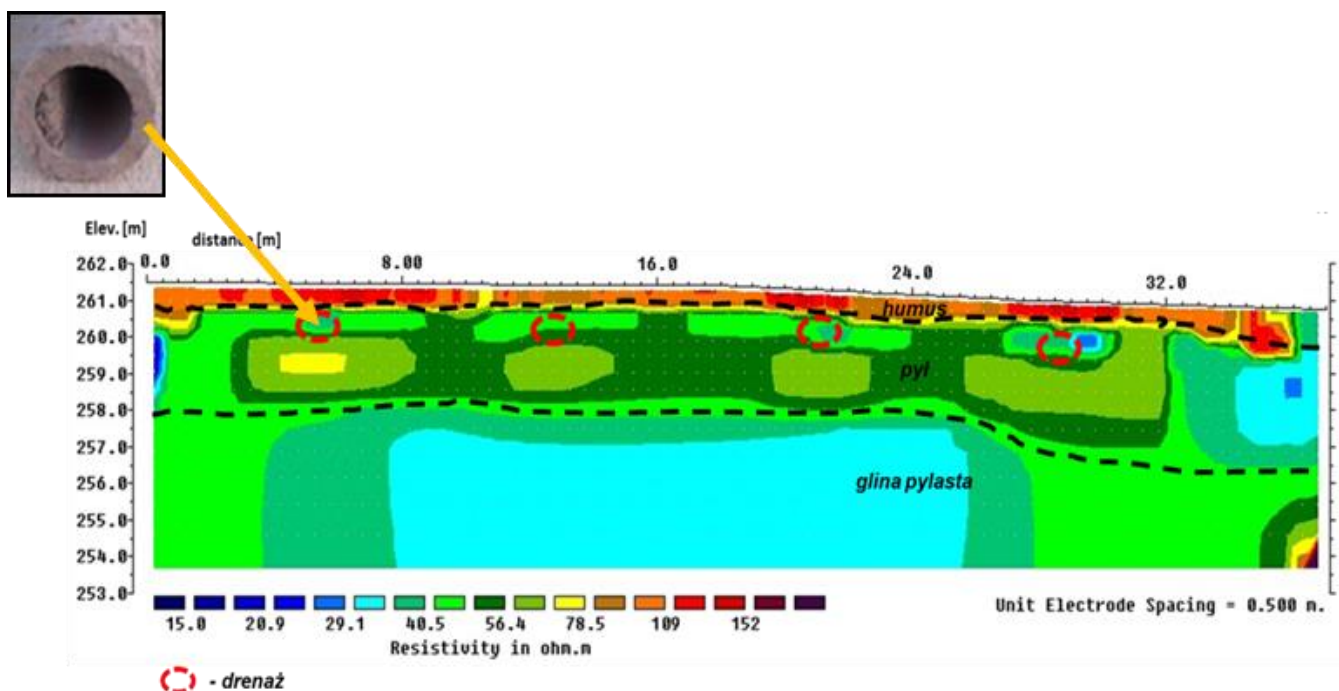
Zaznaczające się wysokie wartości oporności warstwy przypowierzchniowej świadczą o jej małej wilgotności. Poniżej stwierdzono obecność utworów lessopodobnych

składających się z pyłów. Granica między nimi, a gliną pylastą przebiega prawdopodobnie na głębokości około 258,0 m n.p.m. Warstwa pyłów charakteryzuje się wyższą opornością. Jej miąższość można określić na około 1,5 m do 2 m.

Na podstawie analizy przedstawionych przekrojów w utworach lessopodobnych zbudowanych z pyłów zaobserwowano zmiany oporności rzeczywistej ośrodka, w postaci charakterystycznych anomalii. Widoczny owalny powtarzający się regularnie co 8 m kształt, pochodzi od wykonanego na tym terenie drenażu. Głębokość ułożenia rur drenażowych możemy określić na około 1 m p.p.t., w utworach pylastych.



Rys. 3. Lokalizacja rury odwadniającej [2].



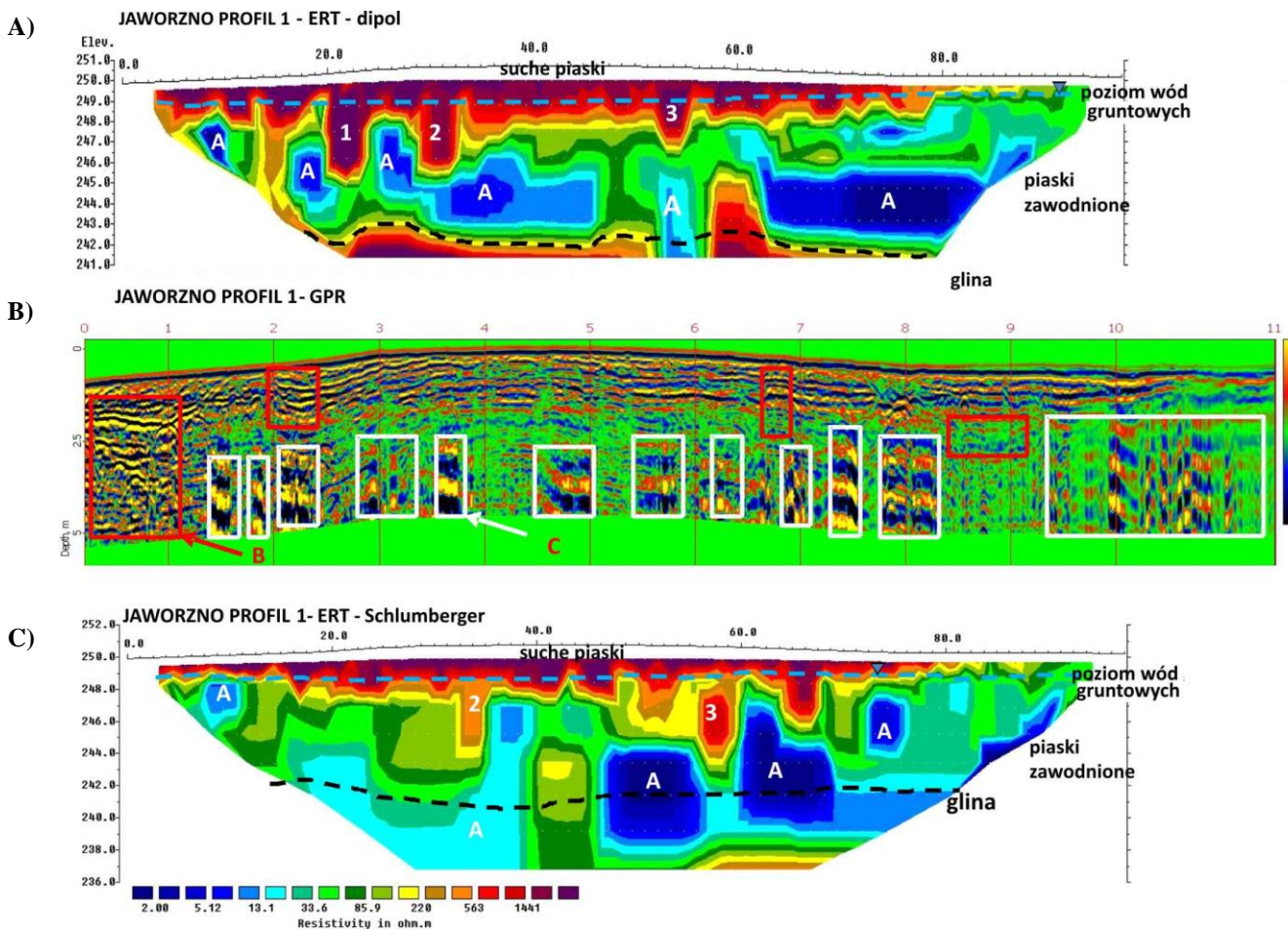
Rys. 4. Lokalizacja systemu drenażu [2].

W badaniach zastosowano tomografię elektrooporową ERT oraz pomiary georadarowe GPR, należące do nieniszczących metod rozpoznania podłoża. Wyniki badań tymi metodami pozwoliły na lokalizację w gruncie stref skażonych odpadami m.in. pestycydów, cyklicznych węglowodorów czy związków azotowych pochodzących z procesów koksochemicznych [3].

Interpretacja badań metodą tomografii elektrooporowej ERT i penetracji georadarowej GPR pozwoliła na wygenerowanie przekroju geoelektrycznego i echogramów w obszarze badanego składowiska Rys. 5. Dyfuzja zanieczyszczeń organicznych w strefie aeracji badanych

profilu doprowadziła w warstwie piasków do obecności skażeń lżejszych od wody, typu rozpuszczalników lub cieczy niewodnych. W strefie saturacji przeprowadzone badania wykazały, że zaszło silne nasycenie substancjami chemicznymi, obejmujące także poziom wód gruntowych. Skażenie o dużym stopniu wystąpiło również poza strefą saturacji, w warstwie przypowierzchniowej glin, co wywołało zaburzenia poziomu oporności.

Badania geofizyczne rozproszonych składowisk odpadów o wysokiej agresywności, pozwalają wyznaczyć podstawowe miejsca skażeń



Rys. 5. Lokalizacja stref skażeń gruntów związkami chemicznymi. A) strefa obniżonej wartości oporności elektrycznej; B) niejednorodności podłoża; C) silne tłumienie fal elektromagnetycznej [3].

2. METODA ELEKTROMAGNETYCZNA

2.1. Podstawy metody elektromagnetycznej

Metody elektromagnetyczne to grupa technik geofizycznych wykorzystujących pole i fale elektromagnetyczne do nieinwazyjnego rozpoznania budowy geologicznej, monitoringu procesów zachodzących w ośrodku geologicznym oraz do lokalizacji obiektów antropogenicznych.

Opisywana w dalszej części podrozdziału metoda magnetometryczna nie jest zaliczana do grupy metod elektromagnetycznych, lecz dla spójności artykułu przedstawiono ją w niniejszym podrozdziale.

2.2. Metoda georadarowa

Metoda georadarowa jest bezinwazyjną techniką geofizyczną, w której wykorzystuje się fale elektromagnetyczne w zakresie częstotliwości od 10 MHz do kilku GHz, do rozpoznania budowy geologicznej i poszukiwania obiektów podziemnych [4].

W zależności od problemu stosuje się odpowiednią technikę badań tzn.: profilowanie refleksyjne, profilowanie refrakcyjne, badania prędkości WARR lub CMP, tomografię prędkościową i tłumieniową (w opcji otwór-otwór lub otwór-powierzchnia). Na etapie badań rekonesansowych stosuje się w większości przypadków krótko-offsetowe

profilowanie refleksyjne, które pokrótce opisano poniżej, a ideę pomiaru przestawiono na Rys. 6.



Rys. 6. Technika profilowania refleksyjnego [5].

Układ antenowy (tj. antena nadawcza Tx i odbiorcza Rx) przesuwa się wzdłuż profilu, a antena nadawcza emituje impulsy elektromagnetyczne co określony interwał odległościowy Δx . Impuls elektromagnetyczny (nazywany impulsem sondującym) propaguje w badanym ośrodku w postaci fali elektromagnetycznej (e-m). Antena odbiorcza przesuwa się wzdłuż profilu równocześnie z anteną nadawczą, rejestrując sygnały odbite (tzw. refleksy), które zapisywane są w formacie cyfrowym na laptopie i wyświetlane w czasie pomiaru na monitorze (Rys. 6); zapis taki nazywany jest echogramem. Pozioma oś na echogramie zapisywana jest w skali odległości natomiast oś pionowa zapisywana jest w skali czasu w [ns]; w procesie przetwarzania danych pomiarowych dokonuje się w odpowiedni sposób konwersji osi czasowej na głębokościową [m].

Propagacja fali e-m zależy od parametrów elektromagnetycznych ośrodka geologicznego, tj. względnej przenikalności elektrycznej ϵ_r [-] i elektrycznej przewodności właściwej σ [mS/m]; trzeci parametr elektromagnetyczny, tj. względną przenikalność magnetyczną ośrodka μ_r przyjmuje się jako wartość stałą, równą 1. Parametry elektromagnetyczne decydują w georadarowej technice refleksyjnej o wartości współczynnika odbicia R [-] i o tłumieniu fal elektromagnetycznych, zgodnie z uproszczonymi zależnościami (gdzie α [dB/m] - współczynnik tłumienia):

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r_g\acute{o}r\acute{o}w\acute{o}r} - \sqrt{\epsilon_{r_anomal\acute{i}a}}}}{\sqrt{\epsilon_{r_g\acute{o}r\acute{o}w\acute{o}r} + \sqrt{\epsilon_{r_anomal\acute{i}a}}}} \quad (2)$$

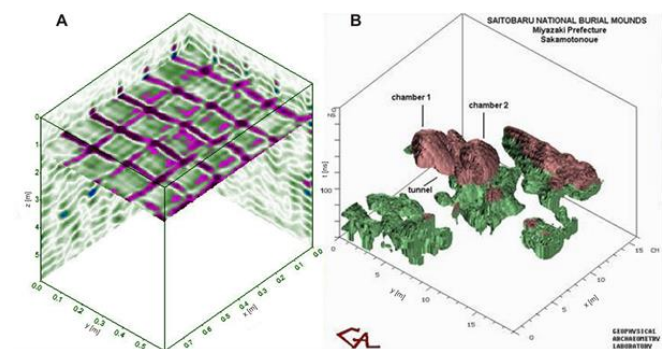
$$\alpha \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3)$$

W metodzie georadarowej w zależności od rozmiarów poszukiwanych obiektów jak również od założonej głębokości poszukiwań oraz w zależności od techniki pomiarowej stosuje się anteny o różnych częstotliwościach i konstrukcjach.

Najogólniej można przyjąć założenie, że anteny o niskich częstotliwościach mają relatywnie duże zasięgi głębokościowe przy niskiej rozdzielczości, natomiast anteny wysokoczęstotliwościowe cechują się dużą rozdzielczością i niewielkim zasięgiem głębokościowym, np.:

- antena 10 MHz – zasięg maks. ok. 60m, średnia rozdzielczość ok. 2m,
- antena 2 GHz - zasięg maks. ok. 1m, średnia rozdzielczość ok. 0,01m.

Na Rys. 7 pokazano przykładowe echogramy w opcji wizualizacji trójwymiarowej (3D). Na Rys. 7A, fioletowym kolorem przedstawiono przebieg elementów metalowych (tj. prętów zbrojeniowych) w płycie betonowej. Na Rys. 7 B, kolorem brązowym pokazano lokalizację podziemnych pustek (komór) na stanowisku archeologicznym.



Rys. 7. Wyniki badań georadarowych: A) lokalizacja elementów metalowych [6]; B) lokalizacja pustek [7].

2.3. Metoda konduktometryczna

Pomiar techniką profilowania elektromagnetycznego (potocznie nazywaną konduktometrią), polega na wytworzeniu pola elektromagnetycznego o natężeniu H_p przez cewkę nadawczą konduktometru i pomiarze wtórnego pola elektromagnetycznego o natężeniu H_s przez cewkę odbiorczą (Rys. 8 – cewki w pomarańczowej obudowie cylindrycznej). Podczas badań terenowych obydwie cewki konduktometru (nadawcza i odbiorcza) przemieszczają się wzdłuż profilu równocześnie ze stałym odstępem S i zawsze w czasie pomiaru są ustawione współpłaszczyznowo, albo pionowo albo poziomo. Głębokość penetracji pola elektromagnetycznego zależy od kilku czynników, a mianowicie od: częstotliwości wytwarzanego pola ω , przewodności elektrycznej badanego ośrodka σ_a , odległości między cewką nadawczą i odbiorczą S , orientacji cewek. Zmiany przewodności elektrycznej σ_a w badanym ośrodku wpływają na zmiany rejestrowanego wtórnego pola elektromagnetycznego H_s . Pozwala to na wyznaczenie zmian przewodności elektrycznej σ_a wzdłuż profilu zgodnie ze wzorem (4) [8].

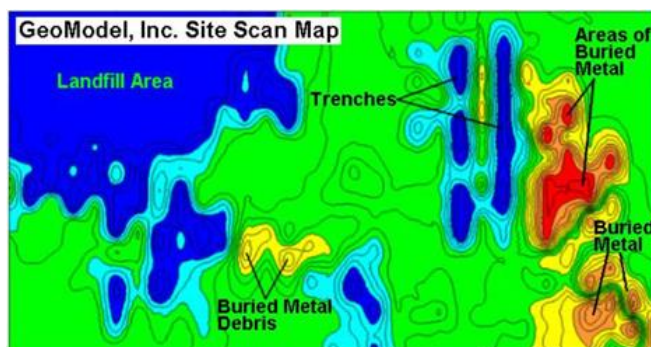
$$\sigma_a = \frac{4}{i\omega\mu S^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right) \quad (4)$$

Wykonując badania wieloprofilowe uzyskuje się mapę zmienności przewodności elektrycznej w badanym rejonie.

Na Rys. 9 pokazano przykładową mapę uzyskaną z badań konduktometrycznych w rejonie naziemnego składowiska odpadów. Zarówno obiekty o dużej przewodności elektrycznej, np. metale (Rys. 9 – czerwone anomalie) jak również rejony zasypane materiałem o niskiej przewodności, np. piaski (Rys. 9 – granatowe anomalie), są łatwe do jednoznacznie interpretacji.



Rys. 8. Pomiary konduktometryczne [9].



Rys. 9. Wyniki badań konduktometrycznych [10].

Do bezpośredniego poszukiwania obiektów metalowych znajdujących się nawet na głębokości kilku metrów budowane są urządzenia (wykrywacze metalu), które rejestrują albo zmianę częstotliwości pola albo różnicę faz pomiędzy polem pierwotnym a wtórnym [9]. Pomiary różnicy faz są wrażliwsze na zmiany przewodności gruntów.

Zaletą tej metody jest prostota pomiaru, a także odporność na zakłócenia pola elektromagnetycznego.

3. METODA MAGNETOMETRYCZNA

Metoda magnetometryczna jest szeroko stosowana w geofizyce inżynierskiej w zagadnieniach, w których zaburzenie jednorodności warstw geologicznych może wiązać się ze zmianą podatności magnetycznej.

Przedmiotem pomiaru jest natężenie naturalnego pola magnetycznego Ziemi. Nad miejscami występowania ciał charakteryzujących się podwyższoną wartością przenikalności magnetycznej wartość natężenia pola wzrasta. Ponieważ najwyższe wartości przenikalności magnetycznej posiadają ferromagnetyki, więc w geofizyce inżynierskiej pomiar ten wykorzystywany jest do poszukiwania obiektów zawierających żelazo.

Metoda ta stosowana jest najczęściej w poszukiwaniach [11], [12], [13].

- uzbrojenia terenu,
- niewybuchów, min,
- rozproszonych obiektów metalowych,
- metalowych pojemników, zbiorników,
- archeologicznych.

Obecnie pomiary najczęściej wykonywane są za pomocą urządzenia zwanego magnetometrem protonowym Rys. 10.

Dokładność pomiaru, w zależności od klasy urządzenia sięga od 0,1 do 0,2 nT.

Ze względu na fakt, że naturalne pole magnetyczne Ziemi zmienia się w sposób ciągły w czasie, w zastosowaniach inżynierskich przedmiotem pomiaru jest zwykle gradient całkowitego pola magnetycznego, który nie zależy od chwili pomiaru, a tylko od obecności obiektu zaburzającego pole. W tym celu wykonywane są równocześnie dwa pomiary przy pomocy dwóch czujników umieszczonych w pewnej odległości jeden nad drugim. Wyżej umieszczony czujnik przyjmowany jest za bazę – punkt odniesienia.



Rys. 10. Pomiar magnetometrem protonowym w układzie gradientowym [14].

Pomiary wykonywane są zwykle wzdłuż wytyczonych profili z wcześniej ustalonym krokiem. Często współrzędne geograficzne każdego punktu pomiarowego są rejestrowane przy wykorzystaniu GPS.

Wyniki pomiarów opracowywane są zwykle w postaci mapy. Pojawiające się na mapie wyraźne anomalie mogą wskazywać na obecność poszukiwanych obiektów. Zasięg głębokościowy pomiaru gradientu pola magnetycznego zależy od rozmiarów obiektów, ale np. w przypadku rurociągów jest rzędu 2 m [11].

Zaletą metody jest łatwość wykonania pomiarów. Wadą jej jest mała odporność na zakłócenia pomiaru spowodowane występowaniem, zwykle płytko leżących przedmiotów żelaznych nie będących obiektami poszukiwań, a także często występujących płytko pod powierzchnią Ziemi osadów zawierających limonit.

4. METODA SEJSMICZNA

Metoda sejsmiczna umożliwia obrazowanie rozkładu parametrów mechanicznych skał przez badanie własności fal sprężystych sztucznie wzbudzonych. Wykorzystuje się tu zależność między prędkością rozchodzenia się fali sejsmicznej, a właściwościami sprężystymi ośrodka skalnego.

Przedmiotem pomiaru są czasy przejścia fal podłużnych i poprzecznych do czujników zwanych geofonami. Znacząc odległości źródło – geofony można wyznaczyć prędkość rozchodzenia się fal w badanym ośrodku. Wyniki pomiaru poddawane są obróbce matematycznej, a następnie interpretacji geologicznej i inżynierskiej. Dzięki temu można określić niejednorodności ośrodka skalnego (gruntu) jako strefy różniące się prędkościami rozchodzenia fal sejsmicznych, a także wynikającymi z tego właściwościami

mechanicznymi. Związek pomiędzy prędkościami fal a własnościami mechanicznymi zawierają wzory (6) i (7).

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (6)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (7)$$

gdzie:

V_p , V_s – prędkość podłużna i poprzeczna,

λ - stała Lammego,

μ - moduł sprężystości poprzecznej,

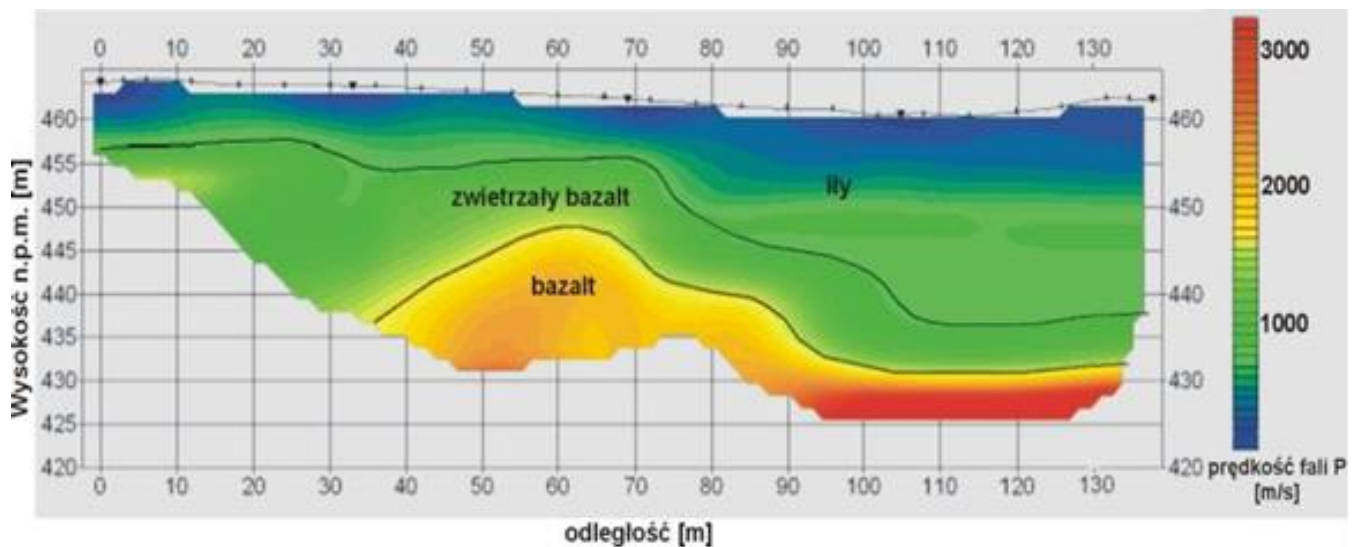
ρ - gęstość,

ν - stała Poissona.

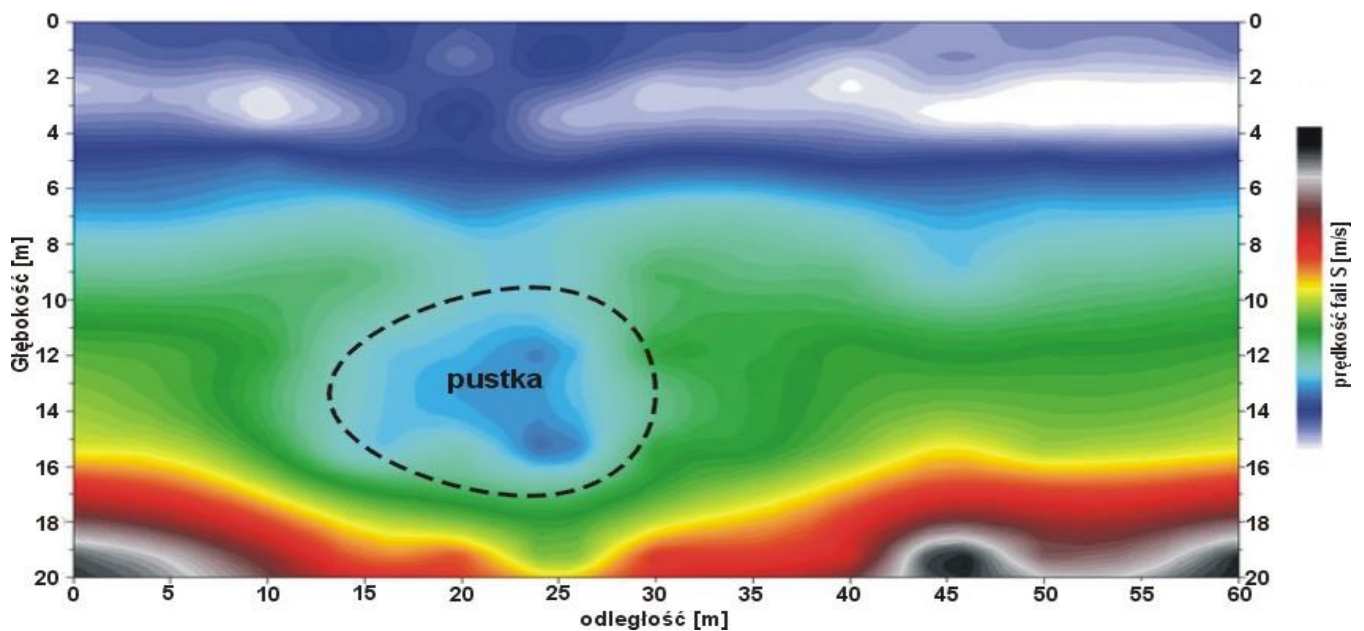
Niejednorodności te mogą być spowodowane występowaniem granic litologicznych, pustek (np. zapomniane wyrobiska kopalniane, budowle), zasypanych dolów czy przedmiotów itp.

Sejsmika inżynierska może być wykorzystana do:

- wyznaczania granic podłoża skalnego oraz granic pomiędzy warstwami o różnych własnościach mechanicznych,
- wyznaczania położenia stref spękań, osłabienia, rozluźnień i zapadania się gruntu i skał,
- lokalizacji nieciągłości ośrodka skalnego, pustek i deformacji,
- określania właściwości geomechanicznych ośrodka, dynamicznych modułów sprężystości: moduł Younga E_d , moduł odkształcenia objętościowego G_d , wsp. Poissona ν_d ,



Rys. 11. Wyznaczanie przekroju litologicznego, granic warstw pomiędzy skałami o różnych litologiach [15].



Rys. 12. Wyznaczanie pustek w górotworze [15].

Rys. 11 przedstawia przekrój złożony z warstwy ilów, warstwy zwietrzałych bazaltów oraz litej skały bazaltowej. Można zauważyć wzrost prędkości rozchodzenia się fali podłużnej wraz z głębokością zalegania warstw związanej ze rodzajem i strukturą warstw. Na Rys. 12 widoczna jest pustka o elipsoidalnym kształcie charakteryzująca się niskimi prędkościami rozchodzenia fali podłużnej, co wskazuje na jej wypełnienie powietrzem.

5. UWAGI KOŃCOWE

Niniejsza praca jest krótką prezentacją metod geofizycznych, które potencjalnie mogą znaleźć zastosowanie w poszukiwaniu obiektów antropogenicznych zalegających w strefie przypowierzchniowej po zaistnieniu katastrof komunikacyjnych, np. po katastrofie smoleńskiej. Metody geofizyczne pozwalają bowiem na różnicowanie obszarów ośrodka geologicznego z punktu widzenia własności elektrycznych, magnetycznych i mechanicznych. Wyniki pomiarów terenowych mogą posłużyć do wskazania miejsc występowania sztucznie utworzonych niejednorodności badanych gruntów, ich deformacji, a także pogrzebanych w gruncie elementów nie będących naturalnymi ich składnikami.

Cechą charakterystyczną poszukiwań geofizycznych jest równoczesne posługiwanie się wieloma metodami, które powinny się wzajemnie potwierdzać i uzupełniać.

Zaprezentowano tutaj tylko cztery metody spośród bardzo wielu innych. Ich wybór podyktowany został uwagami zawartymi w referacie [16] wygłoszonym podczas bieżącej, II Konferencji Smoleńskiej, a dotyczącym geotechnicznych aspektów katastrofy smoleńskiej, prezentującym skutki katastrof lotniczych obserwowanych na powierzchni Ziemi. Wybór ten jest również wynikiem przekonania autorów o przydatności każdej z nich. Jednak w opinii autorów najefektywniejszymi metodami badania gruntu w rejonie katastrofy są metody elektromagnetyczne tak nisko- (konduktometryczna) jak i wysoko- częstotliwościowe (georadarowa). Mogą one być użyteczne zarówno do poszukiwania zakopanych szczątków metalowych samolotu i jego zawartości znajdujących się bezpośrednio pod powierzchnią Ziemi, a także tych które zostały zakryte płytami betonowymi, nawet zbrojonymi. Metody te pozwalają również na szukanie zakopanych rowów, które musiałyby powstać, gdyby samolot uderzył o powierzchnię ziemi. Metoda magnetometryczna mogłaby posłużyć do szukania żelaznych pozostałości katastrofy zalegających płytko pod powierzchnią ziemi. Metoda

sejsmiczna pozwala, w odróżnieniu od badań laboratoryjnych, na oszacowanie dynamicznych własności gruntu w skali rzeczywistej, a nie laboratoryjnej, na próbkach. Parametry te mogą stanowić punkt wyjścia dla symulacyjnych badań efektów uderzenia samolotu o ziemię.

Literatura cytowana

- [1] Pasierb B.: „Techniki pomiarowe metody elektrooporowej” Czasopismo Techniczne, seria Środowisko nr 2-Ś/2012.
- [2] Pasierb B.; „Metoda tomografii elektrooporowej w rozpoznaniu geologicznym podłoża i obiektów antropogenicznych” Czasopismo Techniczne, seria Środowisko nr 2-Ś/2012.
- [3] Chrzanowska E, Pasierb B, Lasek W, Nawrocki W. „Możliwości efektywnej remediacji in-situ gruntów silnie skażonych związkami chemicznymi o znikomej bio-degradowalności” Materiały VII Międzynarodowej Konferencji – Innowacyjne Rozwiązania Rewitalizacji Terenów Zdegradowanych, Ustroń 2-4.X.2013.
- [4] Annan, A.P. (2001) „Ground Penetrating Radar - Workshop Notes”. Sensor and Software Inc., Canada.
- [5] www.malags.se
- [6] www.sandmeier-geo.de
- [7] <http://www.gpr-survey.com/gprslice2.html>
- [8] Sharman P.V., 1997 „An Introduction to Applied and Environmental Geophysics”. Cambridge University Press., Cambridge.
- [9] www.geophysical.biz/electromagnetic_method.htm
- [10] <http://www.geomodel.com>
- [11] Koblanski A. „Zastosowanie gradientowej metody pomiarów magnetycznych w badaniach inżynierskich i ochronie środowiska”. Zesz. Nauk. AGH, Geofizyka Stosowana z. 13, 1993, s. 81-88.
- [12] Antoniuk J., Koblanski A.. „Zastosowanie metod geofizycznych do poszukiwań podziemnej infrastruktury”. Mat. Międzynarodowej Konferencji „Trenchless Tech Warsaw’95, 19-20 kwietnia 1995.
- [13] Antoniuk J., Koblanski A.. „Detekcja odziemnych rurociągów i kabli metodami geofizycznymi”. Technika Poszukiwan Geologicznych nr 3/98.
- [14] <http://www.expins.com/item/geometrics-g858-grad>
- [15] www.georadar.com.pl/76/sejsmiczna/
- [16] Witakowski P. „Geotechniczne aspekty katastrof lotniczych” – prezentacja podczas II Konferencji Smoleńskiej w dniach 21 – 22 X 2013 r.