

BERNADETTA PASIERB*

TECHNIKI POMIAROWE METODY ELEKTROOPOROWEJ

MEASUREMENT TECHNIQUES OF RESISTIVITY METOD

Streszczenie

W artykule przedstawiono techniki pomiarowe geofizycznej metody elektrooporowej: sondowania elektrooporowe, profilowania elektrooporowe EP i tomografię elektrooporową ERT. Omówiono ich podstawowe założenia metodyczne, zalety oraz ograniczenia. Szerzej przedstawiono jeden z najbardziej popularnych wariantów tej metody – tomografię elektrooporową ERT.

Słowa kluczowe: metoda elektrooporowa, sondowania elektrooporowe VES, profilowania elektrooporowe EP, tomografia elektrooporowa ERT

Abstract

The article presents the basic techniques of measuring geophysical resistivity methods: Vertical Electrical Sounding VES, Electrical Profiling EP and Electrical Resistivity Tomography ERT. Discussed the basic methodological assumptions, advantages and limitations. Electrical Resistivity Tomography ERT – one of the most popular variants of this method was presented more widely.

Keywords: resistivity method, Vertical Electrical Sounding VES, Electrical Profiling EP, Electrical Resistivity Tomography ERT

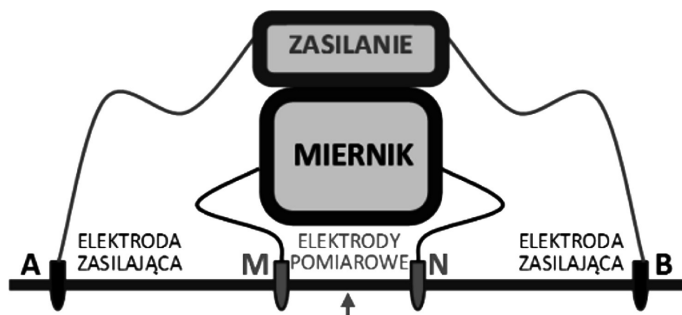
* Dr inż. Bernadetta Pasierb, Instytut Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Metoda elektrooporowa należy do grupy metod geoelektrycznych. Główne założenia i metodykę badań dla tej metody opracowali na początku XX wieku francuscy geofizycy – bracia Schlumberger. Przedmiotem badań w metodzie elektrooporowej są właściwości pola elektrycznego wytworzonego sztucznie w podłożu. Pomiary geofizyczne metodą elektrooporową można wykonywać w wersji klasycznych pionowych sondowań elektrooporowych VES (*Vertical Electrical Sounding*) i profilowań elektrooporowych EP (*Electrical Profiling*) oraz ostatnio bardzo popularną techniką – tomografią elektrooporową ERT (*Electrical Resistivity Tomography*). Dobór metodyki i konkretnej techniki pomiarowej zależy od lokalnej budowy geologicznej badanego obiektu i jego położenia w przestrzeni oraz od planowanych prac.

2. Charakterystyka metod elektrooporowych

Podstawą metod elektrooporowych jest badanie zmian pola elektrycznego wytworzonego sztucznie w ośrodku przez układ elektrod zasilanych prądem stałym. Elektrody umieszczone są w różnych konfiguracjach w zależności od charakteru pomiarów i własności badanego ośrodka. Najczęściej stosowane są proste układy czteroelektrodowe w układzie Wennera i Schlumbergera, składające się z dwóch elektrod zasilających prądowych i dwóch elektrod pomiarowych, leżących na jednej prostej, symetrycznie względem środka układu (rys. 1). Ponadto stosowane są układy dipolowe stanowiące odmianę układów czteroelektrodowych oraz w specyficznych warunkach układy trój- i dwuelektrodowe z elektrodami znajdującymi się w nieskończoności (w dużej odległości od profilu pomiarowego) i nie mające wpływu na pomiar. Wybór układu zależy od rozwiązywanego zagadnienia i od rodzaju i kształtu badanej struktury, spodziewanego kontrastu oporności, charakterystyki posiadanego miernika oraz poziomu występujących w danym obszarze zakłóceń. Układy pomiarowe dodatkowo charakteryzują się różnym stopniem pokrycia profilu, zasięgiem głębokościowym i wrażliwością na pionowe i poziome zmiany oporności badanego ośrodka.



Rys. 1. Układ pomiarowy czteroelektrodowy Schlumbergera składający się z dwóch elektrod zasilających prądowych A i B oraz dwóch elektrod pomiarowych M i N

Fig. 1. Measuring Schlumberger's array consisting of two current electrodes A and B , two measuring (potential) electrodes M and N

W wyniku pomiaru natężenia prądu i napięcia między elektrodami pomiarowymi wyznacza się, zgodnie z prawem Ohma [19], oporność pozorną skał znajdujących się w obrębie wytworzonego pola elektrycznego i charakteryzującą niejednorodny ośrodek geologiczny. Oporność pozorna oznacza uśrednioną wartość wynikającą z rozkładu oporności właściwej w ośrodku.

$$\rho_a = k \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}} \quad (1)$$

gdzie:

- ρ_a – oporność pozorna [Ωm],
- ΔV_{MN} – różnica potencjałów między elektrodami pomiarowymi M i N [V],
- I_{AB} – natężenie prądu emitowanego w podłoże przez elektrody A i B [A],
- k – współczynnik geometryczny układu pomiarowego, zależny od rozstawu np. elektrod [m] dla układu czteroelektrodowego:

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (2)$$

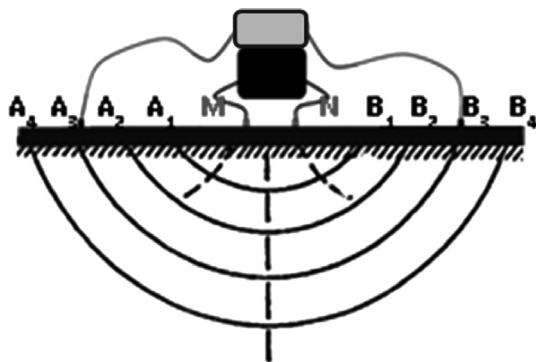
gdzie:

AM, AN, BM, BN – odległości pomiędzy elektrodami [m].

Badania elektrooporowe wykonuje się w trzech podstawowych wariantach: pionowych sondowań elektrooporowych VES, profilowań elektrooporowych EP i tomografii elektrooporowej ERT.

3. Pionowe sondowania elektrooporowe VES

Sondowania elektrooporowe umożliwiają prześledzenie, dla punktu znajdującego się w środku układu pomiarowego, zmian oporności elektrycznej z coraz większej głębokości penetracji, wskutek zwiększania rozstawu elektrod prądowych (rys. 2). Zakres głębokościowy metody określany jest na około 1/3 rozstawu elektrod prądowych. Maksymalny rozstaw między elektrodami prądowymi dobiera się tak, aby przewyższał zakładaną głębokość penetracji przynajmniej 6-krotnie [5]. Dla każdego punktu sondowań otrzymuje się krzywą sondowań przedstawiającą zmiany oporności pozornej, w zależności od rozstawu elektrod $AB/2$. Interpretacja ilościowa sondowania polega na określeniu miąższości oraz oporności właściwej warstw geologicznych, w miejscu gdzie wykonywano sondowanie, na podstawie pomierzonej krzywej połowej. Sprowadza się do rozwiązania zadania odwrotnego, czyli doborze najbardziej prawdopodobnego, odzwierciedlającego dane połowe jednowymiarowego modelu, zakładającego płasko-równoległe ułożenie jednorodnych pod względem oporności warstw. Proces inwersji 1D, polegający na poszukiwaniu najlepszego dopasowania krzywych modelowych do wyników krzywych sondowań odbywa się za pomocą metod numerycznych przez wyznaczenie zagadnienia prostego w kolejnych iteracjach, z założeniem minimalizacji błędu dopasowania [18].



Rys. 2. Schemat pionowego sondowanie elektrooporowego VES, linie prądowe przy różnych położeniach elektrod A i B

Fig. 2. Vertical Electrical Sounding VES scheme, current lines at different positions of the electrodes A and B

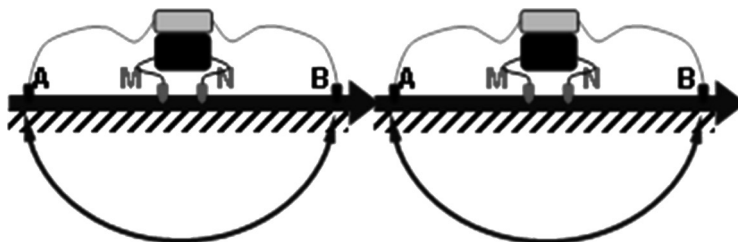
Pierwsze numeryczne rozwiązania technik iteracji opisali w swych pracach Loke M.H., Barker R.D. w 1996 r. [7] oraz Loke M.H. w 1998 r. [8]. Jednym z podstawowych problemów interpretacji danych jest niejednoznaczność inwersji związana z występowaniem zjawiska ekwiwalencji. Krzywej polowej może odpowiadać wiele modeli teoretycznych przy zachowaniu na porównywalnym poziomie błędu dopasowania modeli [12]. W inwersji 1D istotnym ograniczeniem jest także nieuwzględnienie w interpretacji pojedynczego sondowania, poziomych zmian oporności elektrycznych, co w przypadku skomplikowanej budowy geologicznej prowadzi do znacznych różnic w interpretacji rzeczywistego układu warstw [17]. Końcowym etapem interpretacji sondowań jest analiza geologiczna pomiarów, w której poszczególnym warstwom o określonej miąższości przypisywany jest litologiczny charakter na podstawie ich oporności oraz danych z wierceń.

4. Profilowanie elektrooporowe EP

Profilowanie elektrooporowe polega na wykonaniu serii pomiarów zadanym układem pomiarowym wzdłuż linii profilu z określonym krokiem próbkowania, przy zachowaniu stałych odległości między elektrodami. Pomiaru zmian oporności pozornej wykonuje się na pewnej stałej głębokości wzdłuż linii profilu (rys. 3).

Zasięg głębokościowy metody zależy głównie od odległości pomiędzy elektrodami doprowadzającymi prąd, oporności właściwej warstw, którymi prąd przepływa oraz panujących na danym obszarze warunków zawilgocenia. W metodzie profilowań elektrycznych stosuje się kilka różnych rozstawów elektrod w celu zbadania warstw na kilku poziomach.

Na podstawie wyników profilowania elektrooporowego sporządza się krzywą zmian oporności pozornej wzdłuż linii profilu. Interpretacja krzywych profilowań ma charakter tylko jakościowy, pozwala uzyskać dane dotyczące parametrów podłoża, tektoniki, przebiegu kompleksów litologicznych, kształtu i stref spękań, położenia ciał zaburzających i wkładek utworów wysoko- lub niskooporowych itp.



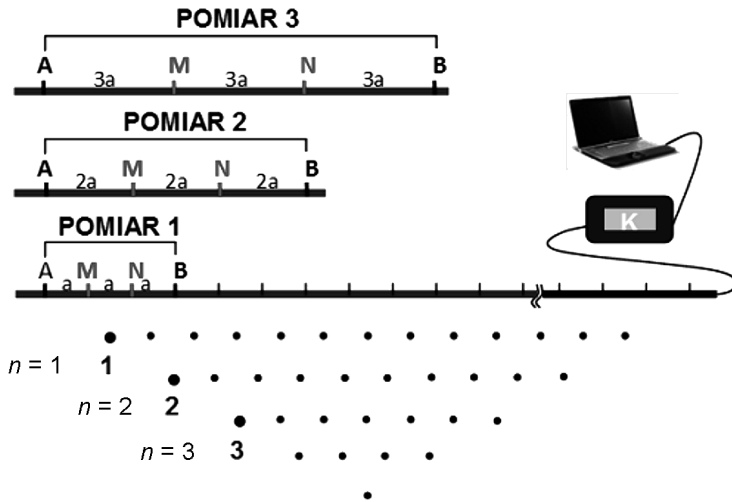
Rys. 3. Schemat profilowania oporności EP, linie prądowe przy różnych położeniach układu pomiarowego *AMNB*

Fig. 3. EP Electrical Profiling scheme, current lines at different positions of the measuring system *AMNB*

Informacje otrzymywane z dwóch klasycznych metod elektrooporowych: profilowań elektrooporowych i pionowych sondowań elektrooporowych mają charakter jednowymiarowy, co oznacza, że zmiany oporności elektrycznej ośrodka w przypadku sondowań elektrooporowych określane są w pionie, natomiast w profilowaniach elektrooporowych zróżnicowanie oporności elektrycznej ośrodka określa się w kierunku poziomym [16]. Dobór metodyki i konkretnego systemu pomiarowego zależy od lokalnej budowy geologicznej badanego obiektu i jego położenia w przestrzeni. Metodę sondowań elektrycznych stosujemy w warunkach spodziewanych poziomych lub lekko nachylonych granic, natomiast metodę profilowań w warunkach stromych granic między utworami lub granic pionowych. Wyniki badań elektrooporowych przedstawiane są w formie pionowych profili, przekrojów i map zmian oporności z interpretacją geofizyczną lub geologiczno-inżynierską.

5. Metoda tomografii elektrooporowej ERT

Metoda tomografii elektrooporowej podobnie jak pozostałe metody elektrooporowe wykorzystuje zróżnicowanie własności elektrycznych ośrodka. Metoda tomografii elektrooporowej stanowi połączenie profilowania elektrooporowego, ze względu na pomiary prowadzone wzdłuż profilu i sondowania geoelektrycznego z powodu wzrastającego zasięgu głębokościowego w trakcie badań. Liczba pomiarów metodą tomografii elektrooporowej odpowiada wykonaniu kilkunastu klasycznych profilowań układami o różnych zasięgach głębokościowych i kilkudziesięciu sondowań o różnych maksymalnych długościach linii zasilającej [17]. Seria ciągłych pomiarów wykonywana jest na podstawie automatycznego doboru kombinacji 4 elektrod, spośród wszystkich podłączonych w równych odstępach do kabla wzdłuż profilu, zgodnie z zadanym typem układu np. Wennera, Schlumbergera, dipolowo-osiowym, oraz dla układów trój- lub dwuelektrodowych z uwzględnieniem elektrod odsuniętych na znaczną odległość – teoretycznie nieskończoną. Przed wykonaniem pomiarów wprowadzane są dane dotyczące geometrii rozstawu, długości profilu oraz parametrów pomiaru, jak również sprawdzany jest kontakt elektrod z podłożem. Na bieżąco prowadzona jest kontrola jakości pomiarów i analiza błędów. Pomiary wykonywane są układami o coraz większych rozstawach z zadanym krokiem wzdłuż wyznaczonego profilu (rys. 4).



Rys. 4. Schemat obserwacji w metodzie tomografii elektrooporowej (na podstawie [6])

Fig. 4. Schematic observation in Electrical Resistivity Tomography ERT method

Maksymalny rozstaw układu pomiarowego zależy od długości profilu i przekłada się na zasięg głębokościowy badań. Uzyskany trapezowaty kształt przekroju jest efektem zmniejszającej się wraz ze wzrostem odległości między elektrodami liczby pomiarów. Gdy długość profilu przekracza maksymalną długość kabla, odpowiednia procedura umożliwia przeniesienie elektrod z początku profilu na jego koniec i kontynuację pomiarów. Średnia głębokość penetracji pomiaru wynosi w zależności od zadanego układu pomiarowego od $1/3$ – $1/6$ odległości między skrajnymi elektrodami. Na zasięg głębokościowy ma także wpływ charakterystyka opornościowa badanego ośrodka zależna od takich czynników, jak: wilgotność, porowatość, zasolenie i in. [6]. W metodzie obrazowania elektrooporowego dzięki większej niż w przypadku tradycyjnych metod elektrooporowych rozdzielczości przestrzennej pomierzonych parametrów, możliwe jest zastosowanie w interpretacji inwersji 2D. Zakładany model geoelektryczny ośrodka w geometrii dwuwymiarowej 2D uwzględnia zmienność oporności elektrycznej w płaszczyźnie pomiarowej zarówno w kierunku pionowym, jak i poziomym. Jest to zasadnicza różnica w porównaniu z interpretacją ilościową sondowań elektrooporowych, w której zakłada się model jednowymiarowy 1D, obrazujący płasko-równoległy układ warstw i charakteryzujący się stałymi w poziomie parametrami oporności [17]. Interpretacja geofizyczna w metodzie tomografii elektrooporowej wykorzystująca proces inwersji 2D wspomagana jest modelowaniem z zastosowaniem metody różnic skończonych lub doskonałej, metody elementów skończonych. Pozwala uzyskać wyniki dla obiektów o skomplikowanych kształtach przez dyskretyzację na mniejsze skończone elementy o regularnych, prostych wymiarach, dla których rozwiązanie jest aproksymowane (metoda iteracyjna) do momentu osiągnięcia zadawalającej dokładności przez konkretne funkcje (wielomiany) służące do opisu rozkładu analizowanej wielkości. Zastosowanie zaawansowanych technik obliczeniowych ma wpływ na ograniczenie wieloznaczności rozwiązań i pomaga uzyskać dwuwymiarowy rozkład oporności elektrycznej ośrodka, jak najbardziej zbliżony do roz-

kładu oporności rzeczywistej [6, 7]. Wyniki pomiarów metodą tomografii elektrooporowej przedstawiane są w formie przekrojów oporności pozornej, analogicznie do danych uzyskanych na drodze klasycznych sondowań geoelektrycznych lub profilowań. Metoda tomografii elektrooporowej umożliwia również szybkie uzyskiwanie powierzchniowych map oporności pozornej, przestrzennych odwzorowań rozkładu oporności pozornej i ich analizę.

6. Zastosowanie metody tomografii elektrooporowej

Metoda tomografii elektrooporowej w stosunku do klasycznych metod elektrooporowych charakteryzuje się szerokim zakresem stosowalności. Wykorzystywana może być w pracach poszukiwawczych i kartowaniu geologicznym do rozpoznania budowy geologicznej, wyznaczania głębokości i miąższości warstw, nadkładu oraz nasypów, zalegania podłoża skalnego oraz lokalizacji struktur krasowych i określania lokalizacji i zasobności surowców mineralnych [1, 15, 18]. Coraz szerzej stosowana jest również w badaniach geomorfologicznych, a w szczególności w badaniach wieloletniej zmarzliny górskiej [13, 14]. Może być również stosowana w geologii inżynierskiej do określania stabilności skarp i nasypów, stanu osuwisk, wyznaczania ich płaszczyzn poślizgu oraz stref nieciągłości i spękań [11, 12, 15]. W badaniach geotechnicznych służy do określania stanu technicznego budowli hydrotechnicznych i ziemnych, wykorzystywana jest do lokalizowania zapadlak i pustek, ustalania przebiegu granicy utworów słabo przepuszczalnych, szczelności i struktury zapór, stref o rozluźnionej konstrukcji i słabym zagęszczeniu [1, 3, 14]. Szczególnie efektywna jest w silnie przewodzących ośrodkach, np. w gliniastych gruntach, gdzie inne metody geofizyczne są nieprzydatne. W badaniach hydrogeologicznych metoda tomografii elektrooporowej jest szczególnie polecana do wykrywania warstwy wodonośnej w utworach czwartorzędowych, obecności i zasięgu rozprzestrzenienia się wód zmineralizowanych w ośrodku skalnym, do określania kierunku spływu i zalegania zwierciadła wód podziemnych i charakteryzowania podpowierzchniowych warunków hydrogeologicznych. Metoda tomografii elektrooporowej znajduje również zastosowanie w ochronie środowiska. W badaniach środowiskowych bardzo efektywna jest w lokalizacji źródeł zanieczyszczeń i dróg ich migracji, kartowaniu dobrze przewodzących skażeń albo zanieczyszczeń gruntu metalami ciężkimi [16]. Metodą tą możliwe jest kartowanie zarówno w płaszczyźnie poziomej, jak i pionowej aureoli skażeń wokół potencjalnych źródeł związanych ze składowiskiem odpadów, oczyszczalnią ścieków, mogielnikami i zbiornikami paliw oraz obiektów mogących stanowić zagrożenie dla środowiska [10, 20]. Metodą tomografii elektrooporowej można prowadzić monitoring migracji i dynamiki zmian skażeń, kontrolę jakości środowiska gruntowo-wodnego [4, 11]. Odgrywa również znaczną rolę w planowaniu i analizie prospekcji archeologicznej [9]. Wykorzystywana jest w rozpoznaniu morfologii antropogenicznej przez lokalizację nawarstwień kulturowych i identyfikację podziemnych pozostałości architektonicznych. Metoda tomografii elektrooporowej stosowana jest również w detekcji podziemnych obiektów antropogenicznych [17]. Pozwala ukierunkować prace wykopaliskowe i przyczynia się do formułowania koncepcji przebiegu zdarzeń historycznych [2].

7. Podsumowanie

Metoda elektrooporowa w poszczególnych wariantach pomiarowych może być wykorzystywana w szerokim zakresie, m.in. w badaniach geologicznych i hydrogeologicznych, geomorfologicznych, środowiskowych, inżynierskich, a także w pracach archeologicznych. Zaletą metody jest jej nieinwazyjność, brak ograniczeń związanych z obszarem badań oraz możliwość ciągłego obrazowania zmian parametrów fizycznych, a nie tylko punktowego, jak ma to miejsce w przypadku badań otworowych i sondowań. Metody elektrooporowe są mniej narażone na zakłócenia zewnętrzne niż innego typu pomiary geofizyczne i dlatego możemy z ich pomocą prowadzić obserwacje w warunkach zabudowy czy nawet w obecności sieci instalacyjnych.

W dwóch klasycznych wariantach metody elektrooporowej: profilowaniach elektrooporowych i sondowaniach uzyskuje się „jednowymiarową” informację o badanym obiekcie, natomiast w pomiarach z wykorzystaniem techniki tomografii elektrooporowej możliwe jest otrzymanie dwuwymiarowej, a nawet trójwymiarowej wizualizacji obiektu badań. Korzyścią stosowania tomografii elektrooporowej jest również krótszy czas pomiarów i interpretacji, w stosunku do tradycyjnych technik pomiarowych metody elektrooporowej oraz szybkie uzyskiwanie przestrzennych odwzorowań rozkładu oporności pozornej i znacznie niższy koszt badań.

Literatura

- [1] Bestyński Z., *Metody geofizyczne w geologii inżynierskiej*, Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 446, 2011, 175-182.
- [2] Domogalla W., Mościcki W., *Zastosowanie geofizycznych badań elektrooporowych w rozpoznaniu morfologii antropogenicznej na przykładzie zamku Błogosławionej Salomei w Grodzisku pod Skalą (małopolska)*, Geologia, T. 32, z. 4, 2006, 405-418.
- [3] Kamiński M., Krawczyk M., Zientara P., Derkacz M., *Zastosowanie tomografii elektrooporowej do badania wałów przeciwpowodziowych – wybrane przykłady z Warszawy i okolic*, Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 446, 2011, 183-190.
- [4] Kowalska A., Pierwoła J., *Obrazowanie elektrooporowej wschodniej części otoczenia składowiska odpadów powęglowych Panewniki KWK „Halemba-Wirek”*, Górnictwo i Geologia, T. 5, z. 4, 2010, 149-158.
- [5] Kozera A., *Geofizyka Poszukiwawcza*, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1987.
- [6] Loke M.H., *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*, 2004.
- [7] Loke M.H., Barker R.D., *Rapid Least-squares inversion of apparent resistivity pseudo sections by a quasi-Newton method*, Geophysical Prospecting, v. 44, 1996, 131-152.
- [8] Loke M.N., *RES2DINV, Rapid 2D resistivity and IP inversion using least-squares methods*, User manual, Advanced Geosciences, Inc., Austin 1998.
- [9] Misiewicz K., *Metody geofizyczne w planowaniu badań wykopaliskowych*, P.PH GROSS, Warszawa 1998.
- [10] Mościcki W., Antoniuk J., *Metoda obrazowania elektrooporowego (resistivity imaging). Przykład badań dla celów geologiczno-inżynierskich*, Mat. V Konferencji Nauk. Tech. Geofizyka w geologii, górnictwie i ochronie środowiska, Kraków 1999, 315-325.

- [11] Mościcki W., Antoniuk J., *Zastosowanie metod geoelektrycznych w badaniach związanych z ochroną środowiska geologicznego*, *Publs. Inst. Geophys., Pol. Acad. Sc., M-27 (352)*, 2002.
- [12] Mościcki W., Antoniuk J., *Badania geoelektryczne na przedpolu osuwiska w kopalni diabazu „Niedźwiedzia Góra” koło Krzeszowic*, *Geologia*, t. 32, z. 4, 2006, 389-404.
- [13] Mościcki W., *Uwagi o stosowaniu geofizycznych metod geoelektrycznych w badaniach nieciągłej, wieloletniej zmarzliny górskiej*, *Nauka a zarządzanie obszarem Tatr i ich otoczeniem*, Tom I, Zakopane 2010.
- [14] Mościcki J., Kędzia S., *Investigation of mountain permafrost in the Kozia Dolinka valley, Tatra Mountains, Poland*, *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 2001, 55:1.6.
- [15] Ostrowski Sz., Pacanowski G., *Płytkie badania geofizyczne z wykorzystaniem seismiki inżynierskiej oraz tomografii elektrooporowej*, *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 446, 2011, 215-224.
- [16] Rudzki M., Krawiec A., *Ocena zanieczyszczenia wód podziemnych z wykorzystaniem metody tomografii elektrooporowej*, *Współczesne problemy hydrogeologii*, tom XIII, cz. 2, druk. Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH, Kraków 2007.
- [17] Rudzki M., *Zastosowanie metody tomografii elektrooporowej do wykrywania podziemnych obiektów antropogenicznych*, *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., M. 25 (313)*, 2002.
- [18] Rudzki M., *Zastosowanie metody tomografii elektrooporowej do lokalizacji struktur krasowych*, *Geofizyka Toruń sp. z o.o. www.geofizyka.pl*.
- [19] Stenzel P., Szymanko J., *Metody geofizyczne w badaniach hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich*, *Wydawnictwa Geologiczne*, Warszawa 1973.
- [20] Zdechlik R., Gołębowski T., Tomecka-Suchoń S., Żogała B., *Wykorzystanie metod hydrochemicznych i geofizycznych do oceny wpływu składowisk odpadów górniczych na środowisko wodne*, *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 445, 2011, 725-736.