

## ZASTOSOWANIE METODY MAGNETOTELLURYCZNYCH PROFILOWAŃ CIĄGLYCH W BADANIACH STRUKTURALNYCH

### Application of continuous magnetotelluric profiling to structural studies

Michał STEFANIUK<sup>1,2</sup>, Tomasz CZERWIŃSKI<sup>2</sup>,  
Wojciech KLITYŃSKI<sup>1,2</sup> & Marek WOJDYŁA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska;  
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;*

*e-mail: stefan@geolog.geol.agh.edu.pl, gpklityn@geolog.geol.agh.edu.pl*

<sup>2</sup>*Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych; ul. Jagiellońska 76, 03-301 Warszawa;*

*e-mail: m.wojdyła@pbg.com.pl, t\_czerwinski@pbg.com.pl*

**Treść:** Przedmiotem artykułu są przykłady zastosowania magnetotellurycznych profilowań ciągłych do badań strukturalnych w zróżnicowanych warunkach geologicznych. Dwa spośród przedstawionych przykładów odnoszą się do rozpoznawania struktury allochtonu fliszowego w polskich Karpatach Zewnętrznych oraz jego podłoża. Przykłady z obszaru sudeckiego przedstawiają wykorzystanie magnetotellurycznych profilowań ciągłych do rozpoznawania stref tektonicznych w utworach krystalicznych oraz związanych z nimi stref filtracji wód mineralnych i termalnych. Przykład rozpoznania struktury wysadu solnego pochodzi z rejonu centralnej części wału środkowopolskiego. W strefie platformowej, w rejonie Pomorza Wschodniego, wykonano badania w celu rozpoznania kompleksów geologicznych położonych poniżej silnie ekranującego energię sprężystą horyzontu utworów ewaporatowych cechsztynu. Przedstawiono metodykę badań, rezultaty interpretacji geofizycznej i niektóre aspekty interpretacji geologicznej.

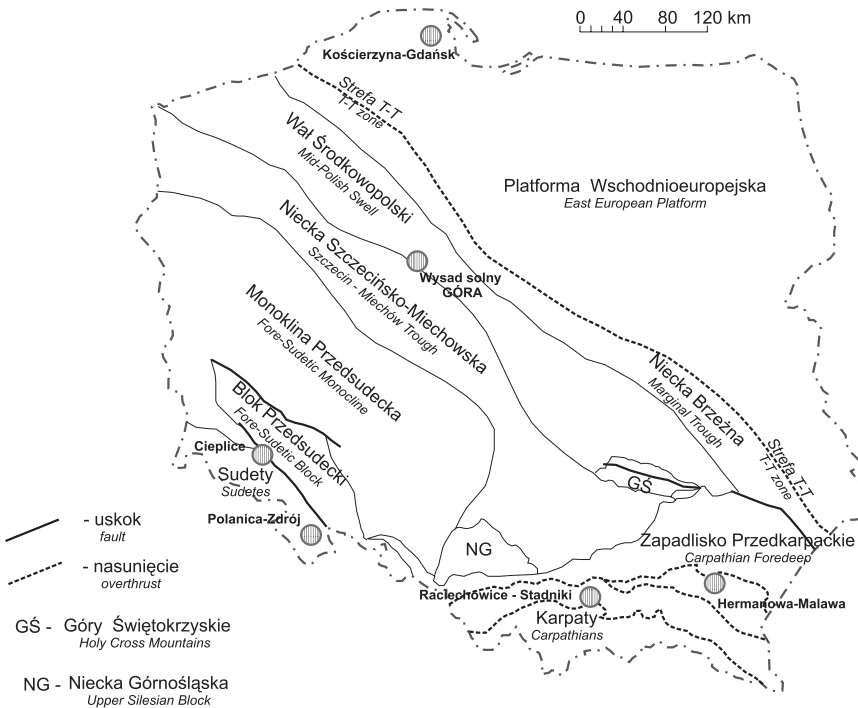
**Słowa kluczowe:** magnetotelluryka, profilowanie ciągle, badania strukturalne, metodyka, Karpaty, Sudety

**Abstract:** The paper presents case studies of the continuous magnetotelluric profiling applied to structural studies under varied geological conditions. Two applications refer to identifying of allochthonous flysch structure and its basement in the Polish Outer Carpathians. The case studies from the Sudetes Mts. present the application of the continuous magnetotelluric profiling to identify tectonic zones in crystalline rock complexes and accompanying filtration zones of mineral and thermal waters. A case of a salt dome that was identified by means of the MT investigations in the central part of the Mid-Polish Ridge is also presented. At the platform-type zone of the East Pomerania, the MT investigations were carried out to recognize geological complexes resting beneath the evaporate Zechstein horizon that screened the elastic energy. The methodology of the MT investigations and results of geophysical interpretation and some aspects of geological interpretation of MT data are presented.

**Key words:** magnetotellurics, continuous profiling, structural investigations, methodology, Carpathians, Sudetes

## WSTĘP

Metody magnetotelluryczne jest to zespół metod geoelektrycznych wykorzystujących harmonicznie zmienne pole elektromagnetyczne do rozpoznawania rozkładu oporności w ośrodku geologicznym. U podstaw tej metody leży założenie pola źródłowego w postaci płaskiej fali elektromagnetycznej równoległej do powierzchni Ziemi (Berdičevski 1968). Pole źródłowe generowane jest poprzez naturalne procesy będące skutkiem oddziaływania wiatru słonecznego na jonosferę lub też propagację w atmosferze fali elektromagnetycznej wywołanej przez odległe wyładowania atmosferyczne (Wait 1962, Strangway *et al.* 1973). W płytkich, wysokoczęstotliwościowych aplikacjach wykorzystywane jest także odpowiednio oddalone źródło sztuczne o specyficznej konfiguracji geometrycznej (Goldstein & Strangway 1975). Badania magnetotelluryczne wykonywane są w różnych wariantach metodycznych. Teoretyczne podstawy głównego wariantu, tzw. sondowań magnetotellurycznych dla ośrodka jednowymiarowego, opracowane zostały niezależnie przez Tichonova (1950) i Cagniarda (1953). Jednym z nowszych wariantów metodycznych metody magnetotellurycznej jest tzw. profilowanie ciągłe (Torres-Verdin 1991). W prezentowanej pracy autorzy przedstawiają szereg przykładów zastosowania metody magnetotellurycznych profilowań ciągłych na obszarze Polski do badań o charakterze głównie strukturalnym (Fig. 1).

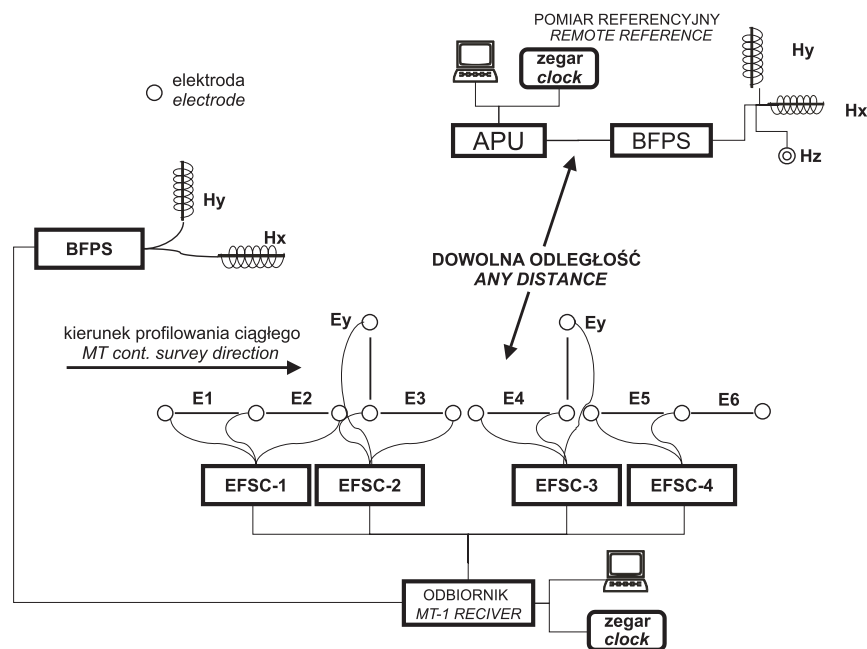


**Fig. 1.** Lokalizacja badań MT wykonanych metodą profilowań ciągłych na tle mapy geologicznej Polski

**Fig. 1.** Location of MT survey made by continuous profiling at the background of geological map of Poland

Prezentowane badania wykonane zostały w zróżnicowanych warunkach geologicznych. Dwa przykłady pochodzą z obszaru Karpat fliszowych, gdzie wykonano dotychczas najwięcej prac z wykorzystaniem metody magnetotellurycznych profilowań ciągłych, zarówno badań eksperymentalnych, jak też zorientowanych na rozwiązanie konkretnego zadania geologicznego. W centralnej części kraju wykonane zostały prace eksperymentalne w celu oceny przydatności tej metody do rozpoznawania struktury i zróżnicowania litologicznego wysadu solnego. Celem badań wykonanych na Pomorzu Wschodnim było przetestowanie możliwości zastosowania ww. metody dla rozpoznawania budowy geologicznej podczęsżyńskich kompleksów osadowych. Dwa ostatnie przykłady odnoszą się do rozpoznawania stref tektonicznych umożliwiających migrację wód mineralnych i termalnych w skałach krystalicznych Sudetów.

Magnetotelluryczne profilowanie ciągłe jest specyficzną modyfikacją metody magnetotellurycznej, której cechą charakterystyczną jest odpowiednio gęste przestrzenne próbkowanie składowej pola elektrycznego równoległej do profilu pomiarowego, takie, że odległości pomiędzy środkami dipoli pomiarowych są równe długości tych dipoli. W rezultacie uzyskuje się ciągłe pokrycie profilu pomiarowego przez elektryczne dipole pomiarowe (Fig. 2).



BFPS - zasilanie czujników magnetycznych  
magnetic sensor power supply  
APU - jednostka pomiarowo-processingowa  
acquisition and processing unit  
EFSC - przełącznik sygnałów elektrycznych  
electric field signal conditioner

E1 .... E6 - dipole elektryczne zlokalizowane w linii profilu  
electric dipoles located along line  
Ey - dipole elektryczne prostopadłe do linii profilu  
electric dipoles located for line perpendicularly

**Fig. 2.** Układ pomiarowy dla magnetotellurycznego profilowania ciągłego

**Fig. 2.** MT continuous profiling measurement array

Próbkowanie pola magnetycznego i składowej pola elektrycznego prostopadłej do profilu pomiarowego jest znacznie rzadsze. Wykorzystano tu fakt, że czułość pola magnetycznego na zróżnicowanie ośrodka geologicznego jest wyraźnie mniejsza niż pola elektrycznego, stąd też opróbowanie pola magnetycznego jest nieracjonalnie gęste w stosunku do opróbowania pola elektrycznego, jeśli obydwa te pola są mierzone z jednakową gęstością (Torres-Verdin 1991). W obliczeniach parametrów magnetotellurycznych pole elektryczne rejestrowane przez szereg dipoli elektrycznych może być odniesione do jednej, centralnie zlokalizowanej pary czujników magnetycznych. Ponieważ profile pomiarowe orientowane są zwykle prostopadłe do rozciągłości struktur geologicznych, przestrzenna zmienność składowej elektrycznej prostopadłej do profilu pomiarowego jest znacznie mniejsza niż składowej równoległej do profilu co uzasadnia możliwość rzadszego jej opróbowania.

Podstawy metody magnetotellurycznego profilowania ciągłego opracowane zostały przez Torres-Verdina (1991) jako tzw. metody EMAP (*ElectroMagnetic Array Profiling*). Metodyka ta w swoich teoretycznych założeniach ma zapewnić zwiększenie wiarygodności interpretacji poprzez eliminację wpływu zjawiska przesunięcia statycznego. Efekt ten wywołany jest przez niewielkie niejednorodności przypowierzchniowe o rozmiarach porównywalnych do rozmiaru układu pomiarowego. W metodzie EMAP wprowadzono rozmieszczenie dipoli elektrycznych „na styk” wzdłuż profilu, co umożliwiło zastosowanie przestrzennej filtracji dolnoprzepustowej impedancji (Torres-Verdin & Bostick 1992b). Taka metoda korekcji przesunięcia statycznego opiera się na założeniu, że suma częstotliwościowo niezależnych wtórnych pól elektrycznych powstających na skutek gromadzenia ładunków elektrycznych na przypowierzchniowych, pionowych granicach opornościowych dąży do zera, gdy długość profilu dąży do nieskończoności. W praktyce skończona długość profilu prowadzi do pewnych błędów, szczególnie gdy profil kończy się na znacznej anomalii przewodnictwa (Simpson & Bahr 2005).

Ponieważ opracowane zostały inne sposoby eliminacji przesunięcia statycznego (np. przy zastosowaniu metody procesów przejściowych i metody elektrooporowej, metoda dekompozycji tensora impedancji, inwersja 2D), profilowanie ciągle stosowane jest głównie w badaniach płytkich, jako wysokorozdzielcza modyfikacja metody MT. W opinii autorów zalety tej metody nie ograniczają się do eliminacji przesunięcia statycznego. Względna nadreprezentacja danych pomiarowych dla niskich częstotliwości pozwala na ich statystyczne uśrednienie, co jest szczególnie istotne w wypadku danych zakłóconych. Powyższe względy uzasadniają zastosowanie metody magnetotellurycznych profilowań ciągłych do względnie głębokich badań strukturalnych (Stefaniuk & Czerwiński 2005).

## **METODYKA I TECHNIKA PRAC MAGNETOTELLURYCZNYCH**

Metoda profilowania ciągłego jest to jeden z najnowszych wariantów metody magnetotellurycznej, polegający na lokalizacji kolejnych dipoli elektrycznych tak, aby odległości pomiędzy środkami dipoli były równe ich długościom (zerowa odległość pomiędzy elektrodami granicznymi). Tak gęste próbkowanie jednej ze składowych pola elektrycznego pozwala na wykorzystanie metod filtracji numerycznej w celu eliminacji zaburzeń pola elektrycznego wywołanych przez niewielkie przypowierzchniowe niejednorodności rozkładu

oporności (Torres-Verdin & Bostick 1992a, b). Podstawowy układ pomiarowy na stanowisku polowym składał się z sześciu dipoli elektrycznych  $E_{x_i}$  ułożonych w linii profilu, dwóch dipoli elektrycznych  $E_{y_i}$  prostopadłych do linii profilu oraz pary czujników magnetycznych lokalizowanych w pobliżu środka linii dipoli elektrycznych (Fig. 2). Długość dipoli elektrycznych wynosi w założeniu 100 m. Dipole składają się z kabla telefonicznego i pary uzemień w postaci elektrod niepolaryzujących Cu/CuSO<sub>4</sub>. Dwie pary dipoli  $E_{x_i}$ ,  $E_{y_i}$  tworzą typowy układ typu L – ze wspólną elektrodą początkową. Linie elektryczne podłączone są do aparatury pomiarowej poprzez wstępny wzmacniacz sygnałów elektrycznych EFSC. Składowe magnetyczne rejestrowane były za pomocą dwu wzajemnie prostopadłych czujników indukcyjnych BF-4, o azymucie takim samym jak dla dipoli elektrycznych. Główne podzespoły aparatury pomiarowej składają się z jednostek pomiarowych i wstępnego przetwarzania danych APU, mikrokomputera rejestrującego pomiary, zegara synchronizującego oraz układów zasilających (MT-1 Operation Manual). Rejestracje składowych naturalnego pola elektromagnetycznego realizowane były w zakresie częstotliwości 575–0.01 Hz. W celu eliminacji wpływu zakłóceń elektromagnetycznych pomiary wykonywane były dwupunktowo z tzw. zdalnym odniesieniem magnetycznym (*magnetic remote reference*) (Goubau *et al.* 1978, Gamble *et al.* 1979).

Zarejestrowane przebiegi czasowe były przedmiotem wielostopniowego processingu numerycznego, którego pierwszym stopniem była selekcja danych i eliminacja segmentów silnie zakłóconych. Wyselekcjonowane dane poddawane były processingowi referencyjnemu w celu eliminacji zakłóceń o zmiennej charakterystyce przestrzennej (Goubau *et al.* 1978). Dla każdego zbioru zawierającego przebiegi czasowe składowych polowych i referencyjnych o określonym paśmie częstotliwości obliczono współczynniki transformat Fouriera oraz odpowiednie wartości widm mocy i krzyżowych widm mocy i zapisano w tzw. zbiorach uśrednionych danych spektralnych. Zbiory uśrednionych współczynników spektralnych służą do obliczenia składowych tensora impedancji  $Z_{xx}$ ,  $Z_{yy}$ ,  $Z_{xy}$ ,  $Z_{yx}$  wiążących zmienne pole elektryczne i magnetyczne na powierzchni ziemi (Sims *et al.* 1971). Znając składowe tensora impedancji, wyznacza się tzw. diagramy kierunkowe impedancji dla wybranych okresów, obrazujące zależność modułu tensora impedancji od orientacji składowej elektrycznej. Składowe  $Z_{xy}$  i  $Z_{yx}$  tensora impedancji wykorzystywane są do obliczenia krzywych amplitudowych i fazowych sondowań magnetotellurycznych, przy czym dla wariantu profilowania ciągłego wykorzystuje się składową  $Z_{xy}$ . W trakcie przetwarzania danych pomiarowych obliczana jest ponadto tzw. skośność tensora impedancji (*skew*). W przetwarzaniu danych wykorzystano procedury numeryczne wbudowane w program processingowy MTR15 będący częścią systemu magnetotellurycznego MT-1 (EMI).

## **GEOFIZYCZNA INTERPRETACJA DANYCH MAGNETOTELLURYCZNYCH**

Interpretacja sondowań MT wykonana została według standardu stosowanego dla wersji profilowań ciągłych. Skonstruowano 2D przekroje rozkładu oporności metodą automatycznej inwersji z wykorzystaniem filtrów Bosticka (Torres-Verdin & Bostick 1992a, b). Algorytm Bosticka wykorzystuje filtry numeryczne przeliczające krzywe amplitudowe i fa-

zowe dla polaryzacji XY na jednowymiarowy rozkład oporności z głębokością. Program EMAPK, będący częścią systemu MT-1, łączy wyniki interpretacji 1D i tworzy dwuwymiarową reprezentację danych magnetotellurycznych pozwalającą na konstrukcję 2D przekroju geoelektrycznego. Program ten pozwala też na wykonanie obliczeń przy zmiennych parametrach (współczynniki filtru Bosticka, krok pomiarowy – w tym wypadku 100 m – oraz minimalne i maksymalne częstotliwości danych pomiarowych), co umożliwi regulację zakresu głębokości penetracji, a więc uzyskanie wysokiej dokładności interpretacji dla określonych przedziałów głębokościowych.

## **STRUKTURALNE BADANIA ALLOCHTONU FLISZOWEGO KARPAT I JEGO PODŁOŻA**

Podstawowymi problemami pojawiającymi się w badaniach geologicznych w obszarze polskiego segmentu Karpat są: rozpoznanie struktury i zmienności litologicznej allochtonu fliszowego oraz podłoża podfliszowego. Utwory geologiczne budujące zarówno orogen fliszowy, jak też górną osadową część podłoża, w rozległych obszarach regionu karpackiego uważane są za perspektywiczne dla poszukiwań naftowych, są więc obiektem różnorodnych prac poszukiwawczych. Złożona struktura orogenu zdecydowanie utrudnia wykonanie i interpretację badań z wykorzystaniem stosowanej standardowo w poszukiwaniach naftowych sejsmiki refleksyjnej. Taka sytuacja powoduje konieczność wykorzystywania innych metod geofizycznych mających w założeniu wspomagać interpretację danych sejsmicznych. Jedną z metod badań, stosunkowo często stosowaną w Karpatach, jest metoda magnetotelluryczna. Znajduje ona zastosowanie głównie w badaniach regionalnych i półszczegółowych ukierunkowanych na rozpoznanie podłoża mezozoiczno-paleozoicznego i prekambryjskiego orogenu. W ostatnich latach wykonane zostały także badania o charakterze szczegółowym z wykorzystaniem metodyki profilowań ciągłych. Zlokalizowane zostały one w rejonie Raciechowice – Stadniki na SE od Krakowa oraz w obszarze pomiędzy Jasłem i Rzeszowem. Wyniki badań magnetotellurycznych umożliwiają rozpoznanie głównych elementów strukturalnych i zróżnicowania litologicznego orogenu fliszowego, wydzielenie osadowego podłoża miocenijskiego oraz rozpoznanie tektoniki podłoża podmiocenijskiego.

Budowa geologiczna Karpat Zewnętrznych (fliszowych) jest skomplikowana ze względu na intensywną tektonikę oraz ściecia erozyjne (Książkiewicz 1972). Można tutaj wyróżnić trzy główne elementy strukturalne:

- 1) podmiocenijskie podłoże platformowe zbudowane z utworów prekambryjskich, paleozoicznych i mezozoicznych;
- 2) molasowe utwory miocenu zapadliska przedkarpackiego;
- 3) nasunięcie karpackie obejmujące jednostki tektoniczno-stratygraficzne: śląską, podśląską, skolską i zgórbicką.

Najstarszymi utworami podłoża platformowego są magmowe i metamorficzne skały prekambru, które przykryte są przez kompleks osadów klastycznych dolnego paleozoiku, oraz węglanowe dewonu środkowego i górnego, rozpoczynające profil postkaledońskiej pokrywy osadowej (Konior 1978, Żaba 1999).

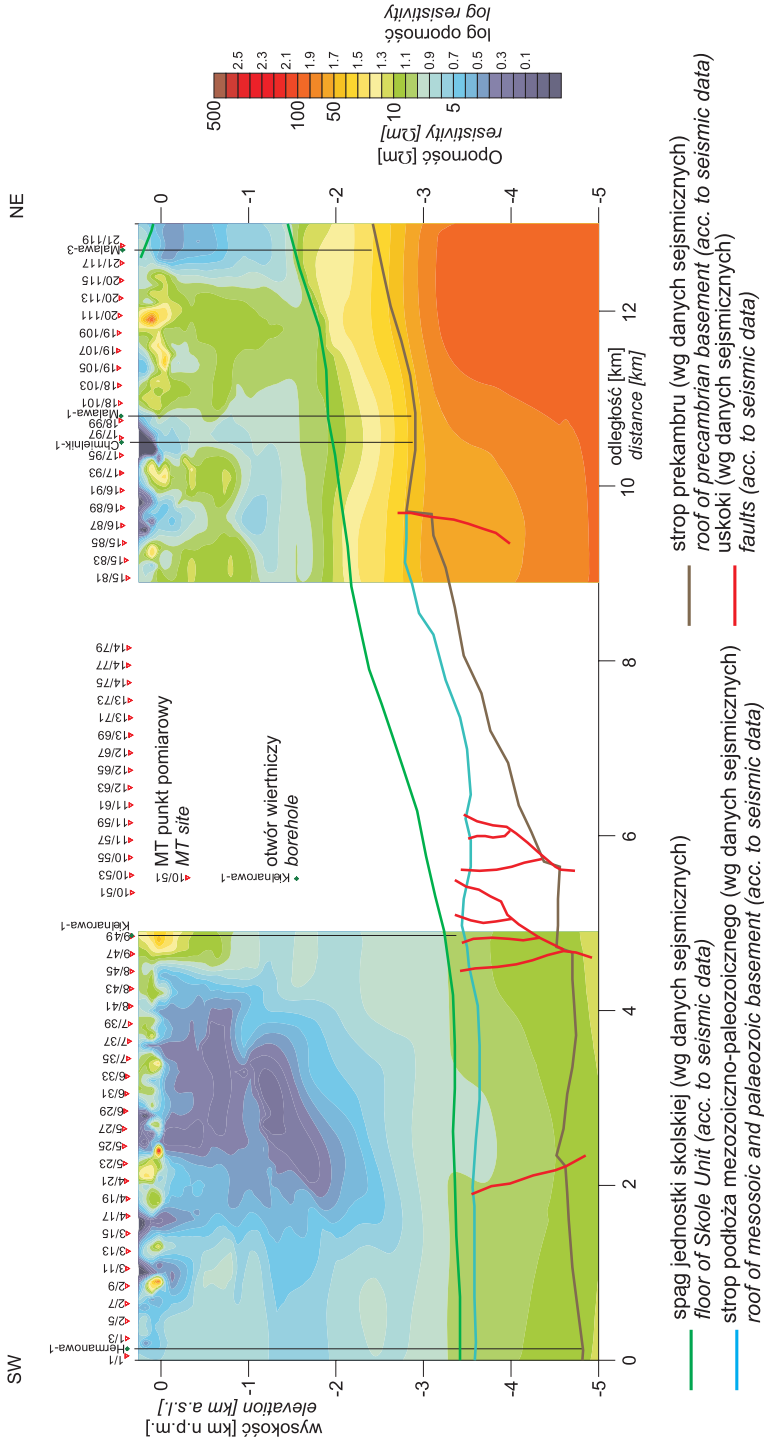
Powyżej zalegają utwory karbonu i lokalnie permu. Mezozoik reprezentowany jest przez klastyczne utwory dolnej jury – liasu, lokalnie podścielonej przez osady triasu. Szerzej rozprzestrzenione są osady jury środkowej – doggeru. Jura górna – malm – reprezentowana jest przez utwory węglanowe i od góry jest na ogół głęboko zerodowana. Lokalnie stwierdzono występowanie utworów kredy często zalegającej w obniżeniach, w postaci silnie zerodowanych płytów o zróżnicowanych miąższościach. Podłoże platformowe przykryte jest przez kompleks klastycznych osadów miocenijskich o zmiennej miąższości, na który nasunięte zostały struktury fliszowe zbudowane z osadów mezozoiku i kenozoiku (Burtan *et al.* 1974).

Tektonika obszaru badań uformowana została głównie przez najmłodsze fazy orogenezy alpejskiej. Ich rezultatem jest, na ogół, blokowa budowa podłoża podmioceńskiego pociętego przez przynajmniej dwa systemy uskoków normalnych o kierunkach NW–SE i SW–NE (Książkiewicz 1972). Pojawiają się również uskoki odwrócone. Tektonika autochtonicznych utworów miocenijskich dostosowuje się do tektoniki głębszego podłoża i nie wykazuje odrębnego stylu. Ich miąższość maleje ku S, tworząc cienki kompleks przykrywający mezozoiczno-paleozoiczną powierzchnię erozyjną, będący pozostałością po ścięciu przez nasuwający się orogen karpacki. Tektonika allochtonu fliszowego ma styl całkowicie odrębny od tektoniki podłoża.

W prezentowanej pracy autorzy przedstawiają dwa przykłady wykorzystania metody magnetotellurycznych profilowań ciągłych w rozpoznaniu struktury i zróżnicowania litologicznego pokrywy fliszowej i jej podłoża. Pierwszym przykładem jest profil ciągły wykonany przez Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych na zlecenie Polskiego Górnictwa Naftowego i Gazownictwa w rejonie Raciechowice – Stadniki na SE od Krakowa (Fig. 1). Powyższy profil przecina południkowo wschodnie kompleksów budujących jednostkę śląską i podśląską w strefie okna tektonicznego Wiśniowej, antykliny Raciechowic i synkliny Rokitnik – Krzyworek (Fig. 3I, II na wkładce). Struktura pokrywy fliszowej jest tutaj wybitnie skomplikowana, co znajduje odzwierciedlenie w rozkładzie wschodni utworów fliszowych (Stefaniuk *et al.* 2003).

Interpretacja danych magnetotellurycznych pozwoliła na rozpoznanie zróżnicowania opornościowego utworów podłoża związanego z ich zmiennością litologiczną oraz obecnością stref tektonicznych. Kompleksy o najwyższych opornościach odpowiadają prawdopodobnie krystalicznym skałom prekambryjskim, na których zalegają względnie niskooporowe utwory klastyczne dolnego paleozoiku i kolejne wysokooporowe utwory węglanowe dewonu i jury górnej (Fig. 3III). Zaznaczające się lokalnie warstwy niskooporowe pomiędzy ww. kompleksami wysokooporowymi należy wiązać z klastycznymi utworami dolnej i środkowej jury oraz być może karbonu. Kompleks utworów miocenu jest wyraźnie niskooporowy. Granica tego kompleksu z pokrywą fliszową nie jest wyraźna, co spowodowane jest niskimi opornościami skał budujących jednostkę podśląską – dolną część nasunięcia karpackiego. Górna część nasunięcia, czyli jednostka śląska, zbudowana jest z gruboławicowych, wysokooporowych piaskowców poprzekładanych ilasto-mułowcowymi warstwami niskooporowymi (Fig. 3III).

Drugi przykład z obszaru Karpat Zewnętrznych przedstawia dwa fragmenty profilu ciągłego Hermanowa-1 – Malawa-3, wykonanego w ramach projektu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr 5 T 12B 041 25, zlokalizowanego na SE od Rzeszowa (Fig. 1).



**Fig. 4.** Przykład zastosowania profilowań ciągłych wzdłuż profilu Hermanowa-1 – Malawa-3 zestawiony z interpretacją profilu sejsmicznego (wg Górecki *et al.* 2004)

**Fig. 4.** Example of application of MT continuous profiling along the Hermanowa-1 – Malawa-3 profile confronted with seismic data interpretation (after Górecki *et al.* 2004)



Pseudodwuwymiarowy rozkład oporności, obliczony za pomocą procedury EMAP, odzwierciedla wyraźną granicę pomiędzy względnie niskooporowymi utworami budującymi dolną część nasunięcia fliszowego oraz osadami mioceńskimi a wysokooporowym podłożem podmioceńskim (Fig. 4). Podłoże wysokooporowe w północnej części profilu wiąże się z metamorficznymi skałami prekambriu. Obniżenie oporności podłoża w części południowej sygnalizuje obecność zupełnie innego typu utworów. Jest to osadowe podłoże paleozoiczne i mezozoiczne zbudowane ze skał o relatywnie niskich opornościach (Stefaniuk & Ślącza 2002). W szczególności niskimi opornościami charakteryzują się utwory ilaste syluru, mające zapewne charakter skał macierzystych.

Zaznacza się ponadto wyraźnie zróżnicowanie rozkładu oporności wzdłuż górnej części przekroju. Oporności fliszu w jego części północno-wschodniej są wyraźnie wyższe niż w części południowo-zachodniej (Fig. 4). Wiąże się to po części ze zróżnicowaniem litologicznym utworów fliszowych. Nie jest ono jednak raczej wystarczające dla uzyskania tak znaczącej zmiany oporności. Efekt podwyższenia oporności w części północnej staje się zrozumiały, gdy weźmie się pod uwagę orientację dipoli elektrycznych układu pomiarowego poprzeczną do rozciągłości wychodni fliszowych. Związany jest on z wystromieniem i intensywnym sfałdowaniem fliszu w tej części profilu, które powodują przybliżenie się oporności interpretowanej do poprzecznej oporności ośrodka anizotropowego.

## GRANICE I WGLĘBNA BUDOWA WYSADU SOLNEGO

Wysady solne zbudowane z soli, gipsów i anhydrytów wyróżniają się wysokimi opornościami względem otaczającego ośrodka geologicznego. Ta charakterystyczna cecha pozwala na efektywne wykorzystanie metod geoelektrycznych do określenia granic wysadu (den Boer *et al.* 2000). Bardziej problematyczne jest określenie wewnętrznej struktury wysadu, ponieważ zróżnicowanie bardzo wysokich oporności jest trudne do zarejestrowania. Obniżenie oporności wewnątrz kompleksów ewaporatowych wiąże się zwykle z obecnością domieszek ilastych.

W niniejszej pracy przedstawiono przykład wykorzystania metody magnetotellurycznej do określenia granic i rozpoznawania wewnętrznej struktury wysadu solnego „Góra”, który zlokalizowany jest w centralnej części antyklinorium kujawsko-pomorskiego w rejonie lokalnego podniesienia Konary – Inowrocław (Fig. 5). Prace pomiarowe przeprowadzone zostały w strefie zachodniej granicy wysadu (Czerwiński *et al.* 2002). Pomiar magnetotelluryczne wykonane zostały wzdłuż czterech profili o długości 600 m każdy, o generalnym przebiegu W–E, zorientowanych poprzecznie do granicy wysadu (Fig. 5). Warunki pomiarowe w obszarze badań były trudne z powodu intensywnej zabudowy oraz infrastruktury komunalnej i kopalnianej, które generują liczne źródła zakłóceń naturalnego pola elektromagnetycznego.

Stropowa partia wysadu ma kształt zbliżony do nieforemnej elipsy o dłuższej osi o długości 1 km biegnącej z NW na SE i osi krótszej o długości około 0.8 km. W przekroju pionowym wysad ma kształt kopuły o ścianach: północnej i zachodniej zapadających stromo, a południowej i wschodniej zapadających łagodnie (Szybist 2003).

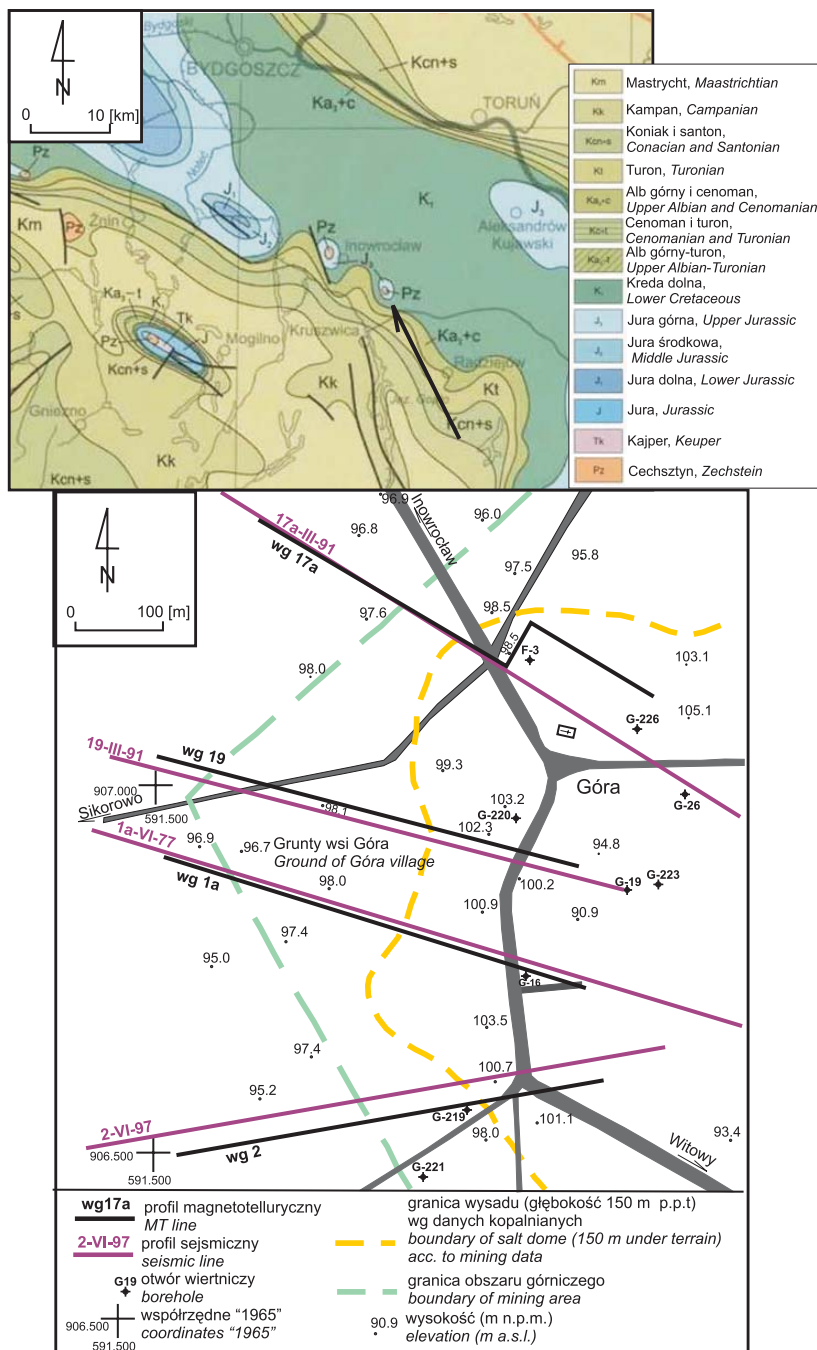


Fig. 5. Lokalizacja badań magnetotellurycznych w rejonie wysadu solnego „Góra” k. Inowrocławia

Fig. 5. Location of magnetotelluric survey in the area of the “Góra” salt dome near Inowrocław

W strefie wysadu i jego bezpośrednim otoczeniu wykonano szereg otworów wiertniczych dających wgląd w budowę geologiczną. W otworach stwierdzono osady permu (cechsztyn) górnej jury, trzeciorzędu i czwartorzędu. Rejon wysadu zaznacza się w morfologii wyraźnym wyniesieniem terenu wzdłuż zachodniej, północnej i wschodniej granicy złoża. Części centralna i południowo-wschodnia w morfologii uwidaczniają się w formie względnego obniżenia.

Wysokooporowy strop wysadu zalega płytko pod powierzchnią Ziemi i jest nachylony w kierunku wschodnim. Powyżej zalegają utwory niskooporowe. W centralnej części struktury wysokooporowej na głębokości od 250 do 400 m p.p.t. obserwuje się strefę o nieco obniżonej oporności. W profilu wg1a (Fig. 6) rozkład oporności jest wyraźnie dwudzielny, przy czym granica pomiędzy ośrodkami wysokooporowym i niskooporowym ma charakter kontaktu niemal pionowego (pomiędzy sondowaniami nr 2 i 3), nieco nachylonego ku W w górnej części. W dolnej części kompleks wysokooporowy rozbudowuje się na zachód. Zachodnia część przekroju charakteryzuje się względnie niskimi opornościami (od kilku do dwudziestu kilku  $\Omega\text{m}$ ), wschodnia natomiast – wysokimi opornościami (od 25 do ok. 600  $\Omega\text{m}$ ).

Mapy obrazujące poziomy rozkład oporności wykonano dla poziomów: 100 m, 150 m, 200 m, 300 m, 400 m i 500 m p.p.t. Przykład mapy dla głębokości 300 m p.p.t. przedstawia figura 7. Analiza rozkładu oporności na ww. poziomie ujawnia złożoną strukturę północno-zachodniej granicy ciała wysokooporowego, które należy wiązać z wysadem solnym lub też wysokooporowymi skałami z otoczenia.

Jednolicie wysokooporowa strefa w SE części obszaru badań odpowiada z pewnością głównej części wysadu. Wysokooporowe odgałęzienia (wyciśnięcia) ciągną się ku NW, rozdzielając się w kierunku powierzchni na dwie wyraźnie zaznaczające się w obrazie opornościowym części (Czerwiński & Stefaniuk 2003). Układ stref o wysokiej i niskiej oporności w NW części obszaru może też być wynikiem obecności mezozoicznych utworów węglanowych zdeformowanych w strefie przywysadowej. Wyjaśnienie powyższego problemu wymaga przeanalizowania danych z wierceń, w tym analizy elektrometrycznego profilowania otworów.

Geologiczna interpretacja wykonanych badań geofizycznych okazała się raczej trudna z dwóch powodów:

- dużego zróżnicowania strukturalnego i litologicznego utworów geologicznych w marginalnej strefie wysadu,
- braku dobrego dowiązania parametrów fizycznych ośrodka geologicznego w otworach wiertniczych do interpretacji danych powierzchniowych (Stefaniuk 2002).

Celem interpretacji jest rozpoznanie geometrii granic wysadu solnego oraz – w miarę możliwości – określenie jego struktury wewnętrznej. Prezentowana interpretacja bazuje na danych magnetotellurycznych oraz na litologicznych i stratygraficznych danych z otworów wiertniczych bliskich profilom geofizycznym. Brak danych elektrometrycznego profilowania otworów jest istotnym mankamentem tej interpretacji, którego skutkiem jest niemożność rozpoznania opornościowego badanych utworów geologicznych. Oszacowanie oporności na podstawie danych litologicznych może natomiast okazać się mylące.

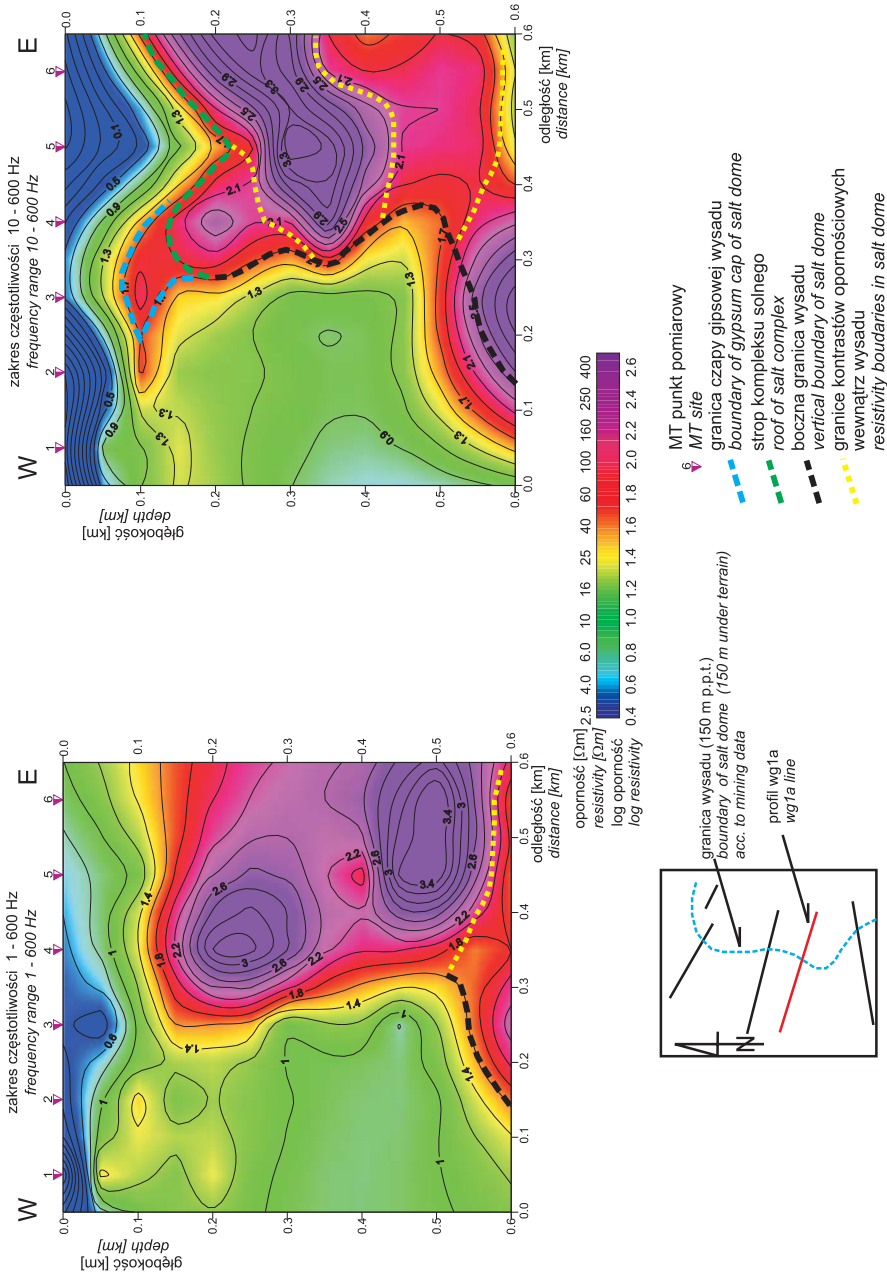


Fig. 6. Przekrój geoelektryczny nr wgła

Fig. 6. Geoelectrical cross-section no. wgt'a

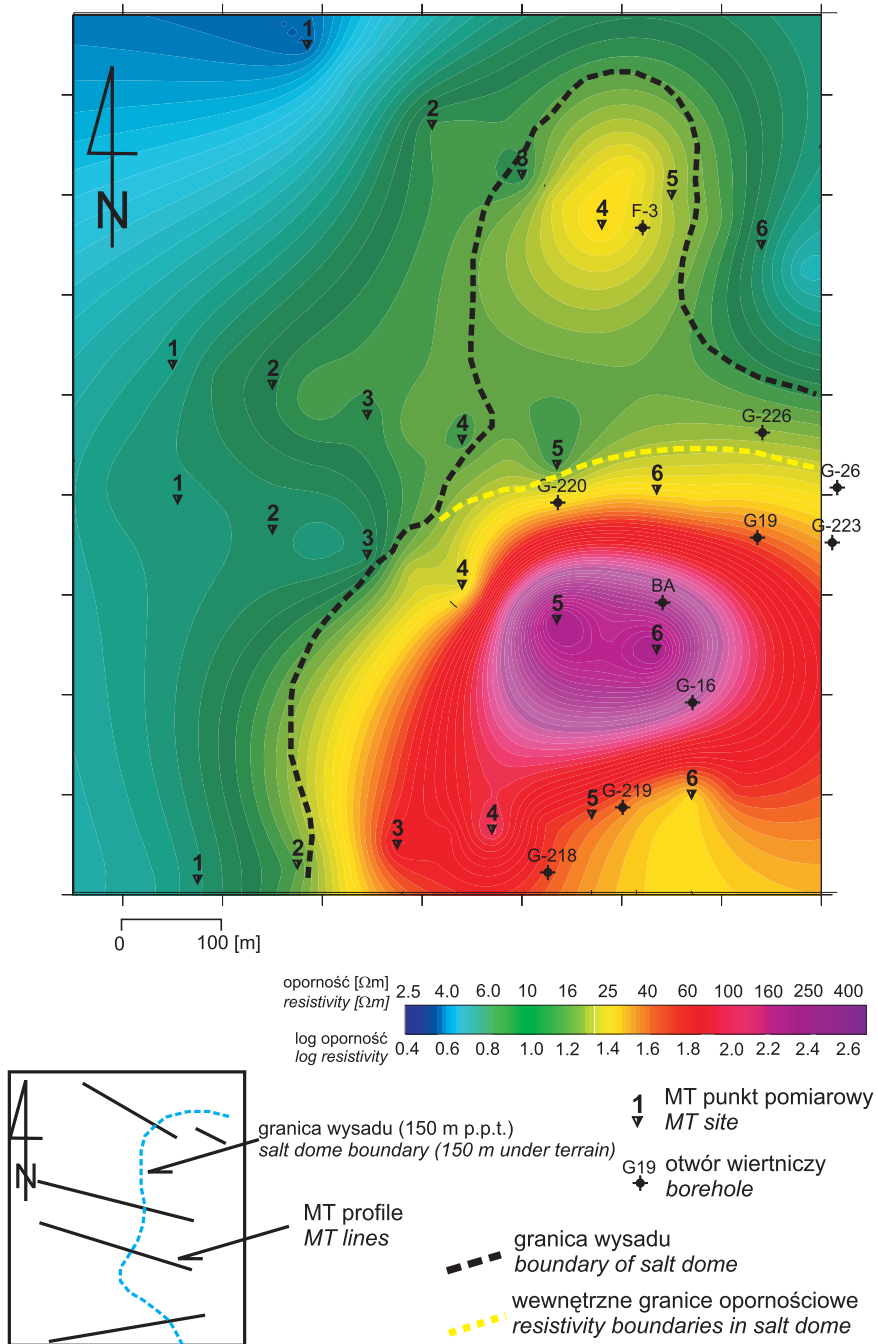


Fig. 7. Rozkład oporności na głębokości 300 m p.p.t.

Fig. 7. Resistivity distribution transformation for a depth of 300 m under terrain

Strop wysadu stanowi tzw. czapa wysadu, zbudowana głównie z gipsu z wkładkami ilów, margli i innych rodzajów skał. W analizowanym obszarze można na podstawie danych otworowych wyróżnić dwa, a nawet trzy rodzaje wykształcenia litologicznego utworów budujących czapę wysadu (Stefaniuk 2002). Czapa wysadu drugiego rodzaju zbudowana jest głównie ze skał ilastych, glin, mułów, margli, z częstymi wkładkami gipsu. Trzeci rodzaj czapy ma charakter brekcji złożonej z okruszków gipsu, wymieszanych z glinami i ilami. Obydwa te rodzaje skał charakteryzują się opornościami względnie niskimi, rzędu kilku – kilkunastu  $\Omega\cdot\text{m}$ . Powyżej czapy wysadu zalegają osady czwartorzędowe o miąższości 30–40 m. Są one wykształcone w postaci glin zwałowych, mułów, ilów i piasków. Utwory te charakteryzują się niskimi opornościami, są jednak cienkie i nie zawsze są rejestrowane przez krzywe magnetotelluryczne. Stąd też w strefie występowania wysokooporowej czapy gipsowej wysokie oporności są ekstrapolowane aż do powierzchni, natomiast tam gdzie czapa wysadu jest niskooporowa, tworzy ona z nadkładem jedną niskooporową warstwę, pod którą rejestruje się wysokooporowy strop soli (Fig. 6).

Kontrast opornościowy pomiędzy wysokooporową czapą gipsową i górnym kompleksem solnym jest raczej problematyczny. Dla profilu wgła (Fig. 6), dowiązanego względnie dobrze do otworów, oporności soli pod czapą wysadu sięgają 500  $\Omega\cdot\text{m}$  i są porównywalne z opornościami czapy gipsowej zarejestrowanymi w pobliskim otworze. Strop kompleksu soli wyznaczony na podstawie danych magnetotellurycznych jest względnie dobrze dowiązany jedynie dla wschodniego krańca przekroju wgła w pobliżu otworów wiertniczych G-16 i BA (Fig. 7). Sole zalegają tutaj pod niskooporową czapą. Strop soli odpowiada tutaj izolacji oporności około 50  $\Omega\cdot\text{m}$  (Fig. 6). Wobec braku innych dowiazań do otworów taką oporność przyjęto jako graniczną pomiędzy solami i niskooporowym otoczeniem. Dla profilu wgła strop soli stromo zapada ku zachodowi do punktu nr 5 (Fig. 6), a następnie równie stromo podnosi się do głębokości około 100 m p.p.t., tworząc charakterystyczną „wypustkę”.

Problematyczna oczywiście jest geologiczna identyfikacja ciał wysokooporowych zaznaczających się na zachodnich i środkowych odcinkach przekroju wgła (Fig. 6). Dowiązując oporności do wschodniego odcinka przekroju, należy sądzić, że są to wyciśnięte i uformowane w charakterystyczną wypustkę utwory solne ciągnące się ku W i NW poza granicę wysadu wyznaczoną na podstawie danych kopalnianych (Fig. 5). Według alternatywnej interpretacji mogą to być węglanowe kompleksy jurajskie (Stefaniuk 2002, Czerwiński & Stefaniuk 2003). Wapienie i dolomity zbite i skaliste mogą osiągać oporności rzędu kilkuset  $\Omega\cdot\text{m}$ . Utwory jurajskie o takim charakterze litologicznym nawiercone zostały w otworze nr 218, zlokalizowanym na skraju obszaru badań, lecz ich oporności nie zostały zweryfikowane przez dane geofizyki wiertniczej ani też przez magnetotelluryczne pomiary powierzchniowe.

Z przytoczonych danych litologicznych dotyczących utworów jurajskich można wnioskować, że są one wyraźnie zróżnicowane facjalnie na stosunkowo niewielkim obszarze. Nie można więc wykluczyć, że to rozkład tych facji generuje obserwowane zróżnicowanie oporności (Stefaniuk 2002, Czerwiński & Stefaniuk 2003). Analiza rozkładów oporności na różnych poziomach głębokościowych wskazuje jednak na wyraźny związek wypustek wysokooporowych z głównym pniem wysadu, co raczej potwierdza tezę, że uformowane zostały one przez wyciśnięte sole.

Możliwe, że na efekt od wyciśniętego „diapiru” solnego nakłada się efekt od zalegających powyżej utworów jury zróżnicowanych facjalnie, a tym samym opornościowo. Skaliste wapienie rafowe i warstwowane, a być może nawet płytowe, będą wysokooporowe, natomiast lagunowe utwory ilaste i margliste raczej wybitnie niskooporowe. Z wysokim stopniem prawdopodobieństwa można wiązać zalegające płytko izolowane strefy wysokooporowe na przekrojach wgła (w pobliżu punktu nr 3) z występowaniem zwartych kompleksów węglanowych.

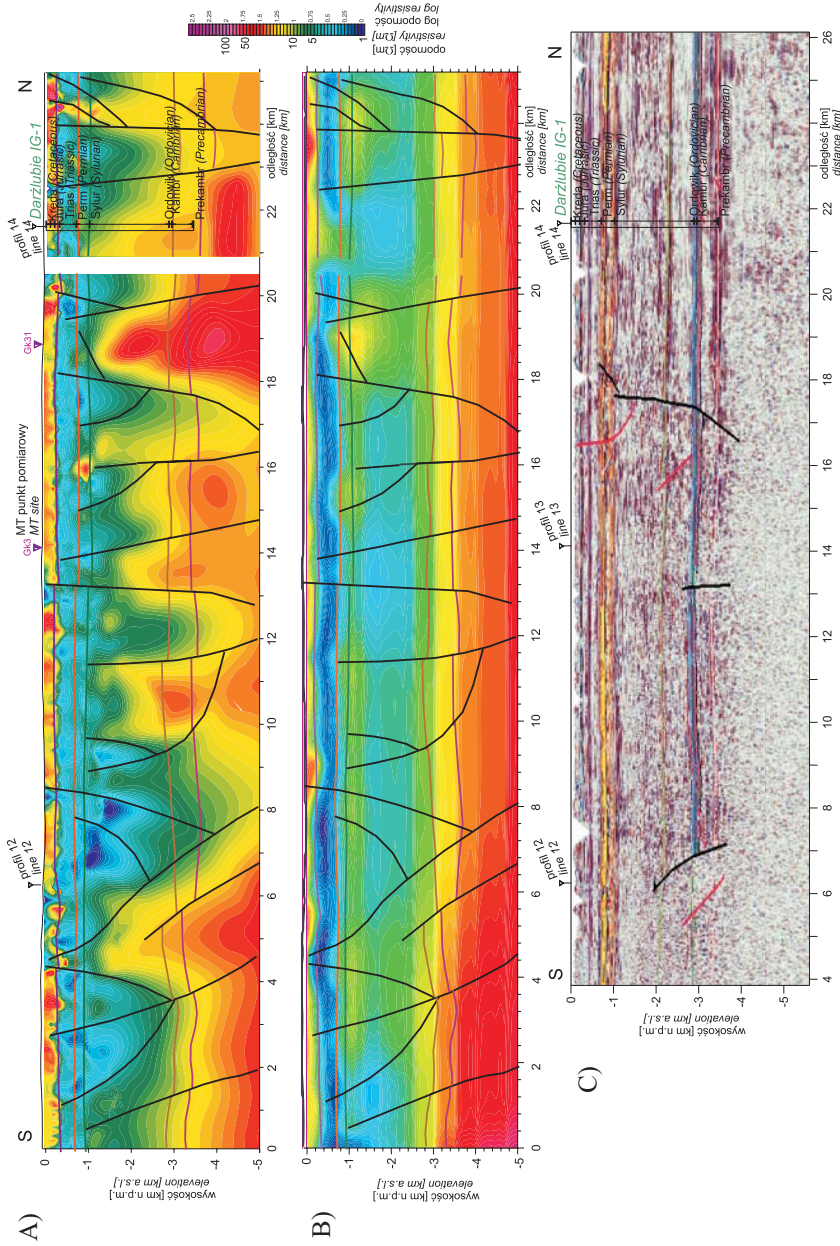
Reasumując, model geologiczny obszaru badań można przedstawić w postaci fragmentu głównego pnia wysadu przykrytego czapą gipsową, zmieniającą charakter na mułowcowo-ilasty w strefie marginalnej oraz bocznego wyciśnięcia soli ku W i NW. Na solnej wypustce leżą wybitnie zróżnicowane facjalnie (a więc i opornościowo) utwory jurajskie. Skaliste wapienie (i dolomity ?) tworzą lokalne izolowane bloki wysokooporowe, w zasadzie nieodróżnialne od soli czy gipsów. Model taki, chociaż dość prawdopodobny, oparty jest jednak na założeniach, których weryfikacja nie jest możliwa na podstawie aktualnie istniejących danych (Stefaniuk 2002).

Dla wyznaczenia pionowej granicy wysadu na przekrojach geoelektrycznych przyjęto kontrast opornościowy w przybliżeniu odpowiadający kontrastowi na granicy czapy ilasto-mułowcowej i utworów solnych (Stefaniuk 2002, Czerwiński & Stefaniuk 2003). Granicę tę wyznaczono w zachodniej części wysadu, dla której wykonane zostały badania magnetotelluryczne. Górną część, do głębokości około 300 m, określono na podstawie przekrojów izoomów obliczonych dla przedziału częstotliwości 10–600 Hz. Poniżej za bardziej wiarygodne uznane zostały dane z przekrojów dla częstotliwości 1–600 Hz. Granice wyznaczone na przekrojach przeniesiono następnie na mapy oporności; ich przebieg określono, posiłkując się interpolowanymi izoliniami rozkładu oporności (Fig. 7).

Wewnątrz głównego pnia wysadu rysują się strefy i kompleksy o zróżnicowanej, chociaż wysokiej, oporności typowej dla soli, gipsów i anhydrytów (Fig. 6, 7). Obniżenie oporności może wiązać się więc z obecnością wkładek ilastych lub też filtracją wód. Obserwowane zróżnicowanie oporności wysadu nie znajduje wyjaśnienia w danych litologicznych z otworów wiertniczych, być może z powodu znacznych odległości otworów od profili magnetotellurycznych.

## **MAGNETOTELLURYCZNE PROFILOWANIE CIĄGŁE W ROZPOZNAWANIU STRUKTURY KOMPLEKSÓW PODCECHSZTYŃSKICH**

Cechszyński kompleks ewaporatowy, występujący w profilu osadów na przeważającej części obszaru Polski, charakteryzuje się wysoką zdolnością do odbijania energii sprężystej. Z tej przyczyny stanowi on trudny do przeniknięcia ekran dla sejsmicznej metody refleksyjnej. W tej sytuacji pojawia się potrzeba uzupełnienia badań sejsmicznych oraz wspomaganie ich interpretacji z wykorzystaniem alternatywnych metod geofizycznych, m.in. metody magnetotellurycznej.



**Fig. 8.** Przykład zastosowania MT profilowania ciągłego na obszarze Pomorza Wschodniego: A) rezultat inwersji wg EMAP; B) rezultat inwersji 2D wg NLCG; C) głębokościowa sekcja sejsmiczna wraz z interpretacją geologiczną (wg Ostrowski *et al.* 2006)

**Fig. 8.** Example of application of MT continuous profiling in the Eastern Pomerania area: A) results of EMAP inversion; B) results of 2D inversion with NLCG; C) depth seismic section and geological interpretation (after Ostrowski *et al.* 2006)



Próbie wykorzystania w tym celu magnetotellurycznych profilowań ciągłych i metody grawimetrycznej podjęło Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych na zlecenie Polskiego Górnictwa Naftowego i Gazownictwa na obszarze Pomorza Wschodniego (Fig. 1).

Profilowania ciągle wykonane zostały wzdłuż odcinków profili sejsmicznych, na których stwierdzono osłabienie sygnału sejsmicznego pochodzącego od granic odbijających położonych poniżej kompleksu cechsztyńskiego (Ostrowski *et al.* 2006). W niniejszej pracy autorzy przedstawiają wyniki interpretacji danych magnetotellurycznych dla profilu biegnącego równoleżnikowo na zachód od Pucka (Fig. 8). Pomimo silnych zakłóceń, pochodzących głównie od linii kolejowej Gdynia – Lębork, uzyskane rezultaty pozwoliły na zaproponowanie alternatywnego modelu budowy geologicznej formacji zalegających poniżej cechsztynu.

Rozkład oporności uzyskany w rezultacie zastosowania procedury EMAP wskazuje na silne zróżnicowanie lateralne kompleksu leżącego pomiędzy spągami cechsztynu i stropem prekambriu, zbudowanego głównie z klastycznych utworów syluru, z niewielkim udziałem osadów kambriu i ordowiku (Fig. 8A). Porównanie ww. przekroju opornościowego z sejsmiczną sekcją głębokościową (Fig. 8C) pozwala na zaobserwowanie specyficznej zależności rozkładu oporności w obrębie wspomnianego powyżej kompleksu z intensywnością sygnału sejsmicznego. Strefy o podwyższonej oporności kojarzą się często z osłabieniem sygnału sejsmicznego. Najprostszym wyjaśnieniem tej zależności mogą być zaburzenia horyzontalnego zalegania warstw, związane z deformacjami tektonicznymi. Horyzontalnie warstwowany ośrodek, złożony z naprzemianległych warstw skał wysoko- i niskooporowych, zaznacza się w polu magnetotellurycznym jako niskooporowy, niezaburzone warstwy będą natomiast doskonale odbijać fale sejsmiczne. Deformacje tektoniczne zaburzają położenie kompleksów ustawiając warstwy poprzecznie do kierunku przepływu prądu, a tym samym zwiększają oporność ośrodka. Taki efekt będzie szczególnie wyraźny dla kompleksów złożonych z miększych warstw niskooporowych (np. ilasto-mułowcowych) przełożonych względnie cienkimi warstwami wysokooporowymi (np. piaskowcowymi). Może też zostać wzmocniony przez procesy metamorficzne związane ze strefami tektonicznymi. Zaburzony ośrodek silnie tłum lub rozprasza energię sejsmiczną.

Przekrój opornościowy określony metodą EMAP dobrze odzwierciedla, w tej sytuacji, strefy tektoniczne. Słabo natomiast zaznaczają się na nim granice poziome. W praktyce wyraźnie zaznacza się tylko płaska granica opornościowa, pojawiająca się na głębokości kilkuset m p.p.t. i oddzielająca wysokooporowy kompleks złożony z węglanowych skał jury górnej, kredy i trzeciorzędu od zalegających poniżej niskooporowych utworów jury środkowej i dolnej oraz triasu (Fig. 8A).

Dobre rozpozniomowanie powyższego kompleksu uzyskano natomiast, stosując automatyczną inwersję 2D sondowań magnetotellurycznych wg algorytmu NLCG (Rodi & Mackie 2001). Duża ilość danych pomiarowych uzyskana poprzez zastosowanie profilowań ciągłych pozwoliła na stabilne i wiarygodne zastosowanie tego algorytmu. Przedstawiony na figurze 8B przekrój geoelektryczny obliczono, wprowadzając do procedury inwersyjnej 2D model startowy określony na podstawie rozkładu oporności w otworze Darżlubie IG-1. Otwór ten zlokalizowany jest we wschodniej części profilu, główne granice zostały jednak wprowadzone na całej jego długości, aż do zachodniego krańca. Więzy w modelu startowym wprowadzono jedynie dla rejonu wspomnianego otworu wiertniczego.

Na przekroju zaznaczają się strefy zróżnicowane opornościowo, nie tak jednak wyraźnie jak na wyżej wspomnianym przekroju oporności według inwersji EMAP. Lepiej natomiast odwzorowane są granice poziome głównych horyzontów stratygraficznych charakteryzujących się wyraźnymi kontrastami oporności (spąg jury górnej, spąg cechsztynu strop prekambriu). Porównanie wyników inwersji 2D z głębokościową sekcją sejsmiczną (Fig. 8C) wykazuje wysoką zgodność przebiegu głównych granic opornościowych i wyróżniających się horyzontów refleksyjnych.

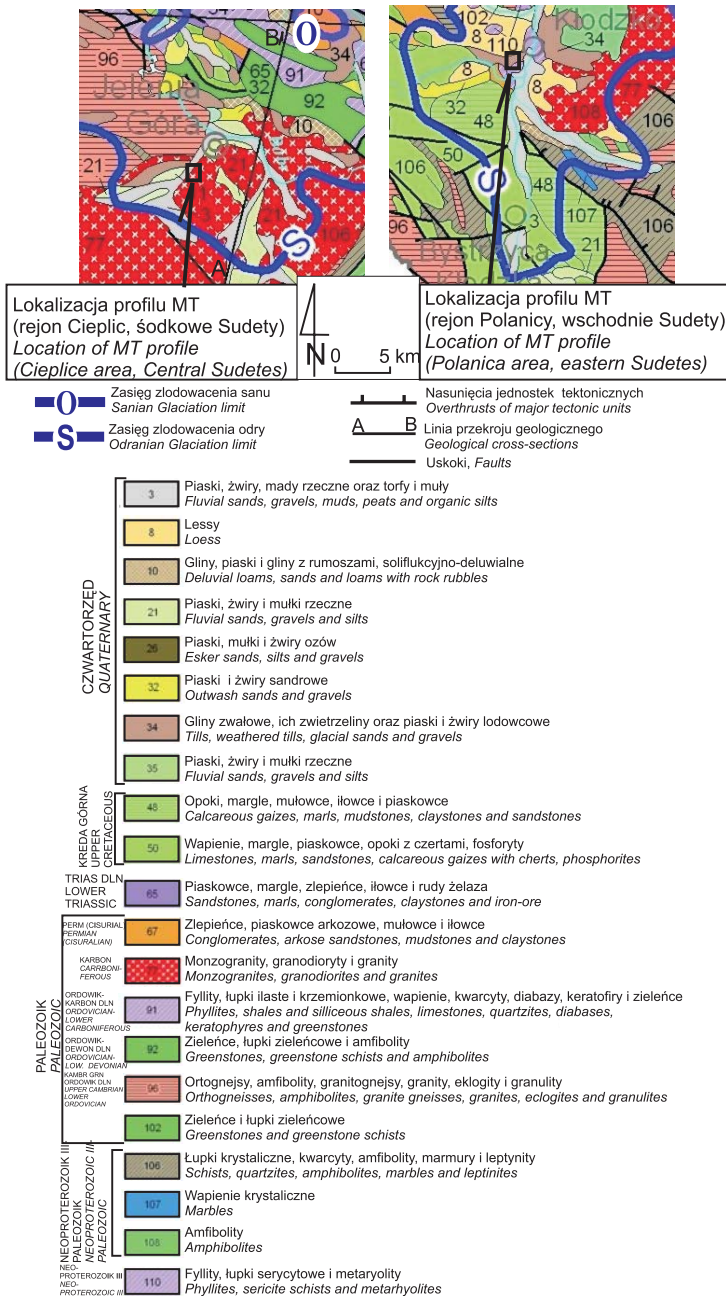
Wyniki badań magnetotellurycznych oraz kompleksowa interpretacja danych geofizycznych i geologicznych pozwoliły na konstrukcję modelu tektonicznego. Tektonika rejonu badań zdominowana jest prawdopodobnie przez zestaw uskoków zrzutowo-przesuwczych o orientacji NW–SE, ukośnie przecinających linię prezentowanego profilu magnetotellurycznego.

## ROZPOZNAWANIE STREF TEKTONICZNYCH W SKAŁACH KRystalicznych

Magnetotelluryczne profilowania ciągle wykorzystane zostały do rozpoznawania stref tektonicznych w obszarze sudeckim. Strefy tektoniczne w wysokooporowych kompleksach krystalicznych wiążą się z reguły z obniżeniem oporności związanym z filtracją wód w systemach szczelin przyuskokowych lub też z metasomatyczną mineralizacją siarczkową. Przedstawione zostały dwa przykłady zastosowania profilowań ciągłych: w rejonie Cieplic-Zdroju w Kotlinie Jeleniogórskiej i w pobliżu Polanicy-Zdroju w Kotlinie Kłodzkiej (Fig. 9).

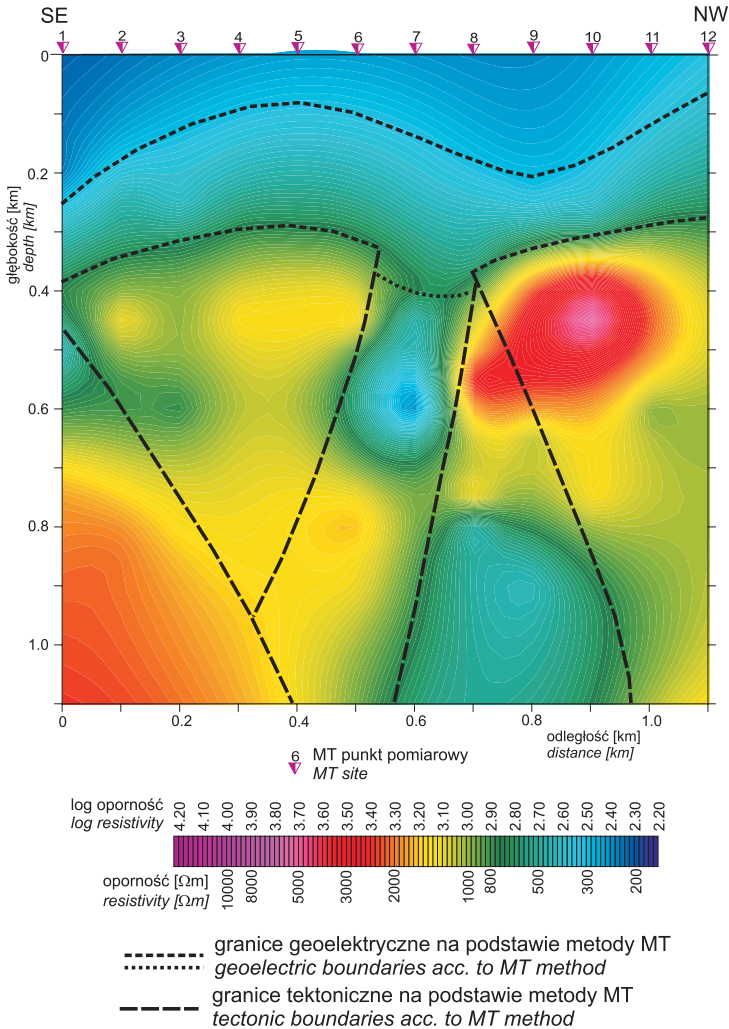
Pierwszy z prezentowanych profili położony jest w obrębie wychodni masywu granitowego w rejonie Cieplic-Zdroju (Fig. 9). Krótki profil ciągły przebiega tutaj w strefie krzyżujących się uskoków przecinających masyw karkonoski. Ze strefą uskokową w tym rejonie związana jest filtracja wód termalnych. Struktura tej strefy zaznacza się wyraźnym zróżnicowaniem oporności w przekroju obliczonym z wykorzystaniem procedury EMAP (Fig. 10). Obecność wody w szczelinach w strefie uskokowej powoduje wyraźne obniżenie oporności ośrodka. Efekt ten wzmacnia wysoka mineralizacja wód i ich podwyższona temperatura. W rezultacie w strefie uskokowej oporność ośrodka obniża się do rzędu 100  $\Omega\cdot\text{m}$ , natomiast normalna oporność skał krystalicznych sięga kilku tysięcy  $\Omega\cdot\text{m}$ . Strop wysokooporowych skał krystalicznych przykryty jest w tym rejonie przez kompleks o względnie obniżonej oporności porównywalnej z opornością strefy tektonicznej. Miąższość tego kompleksu lokalnie osiąga 300–400 m.

Drugi przykład z obszaru Sudetów przedstawia wyniki badań wzdłuż profilu ciągłego w rejonie Polanicy-Zdroju (Fig. 1). Obszar badań położony jest na pograniczu niecki śródsudeckiej i rowu górnej Nysy Kłodzkiej. Podłoże względnie cienkiej warstwy osadowej tworzą w tym obszarze skały metamorficzne (Don & Don 1960). Kompleks osadów reprezentują piaskowce górnej kredy. Nie można też wykluczyć obecności osadów starszych, tj. permu lub karbonu. Jego miąższość szacuje się na kilkaset metrów. W strefie uskokowej zaznacza się filtracja wód mineralnych prawdopodobnie powodująca znaczące obniżenie oporności ośrodka (Fig. 11). Lokalnie oporność ośrodka spada poniżej 10  $\Omega\cdot\text{m}$ . Tak niska oporność wiązać się może z obecnością wód geotermalnych lub też z mineralizacją siarczkową (Farbisz *et al.* 2001).



**Fig. 9.** Lokalizacja magnetotellurycznych profili ciągłych w obszarze Sudetów na tle wycinków mapy geologicznej Polski (wg Marks *et al.* 2006)

**Fig. 9.** Location of magnetotelluric continuous profilings in area of Sudetes at the background of geological map of Poland (after Marks *et al.* 2006)

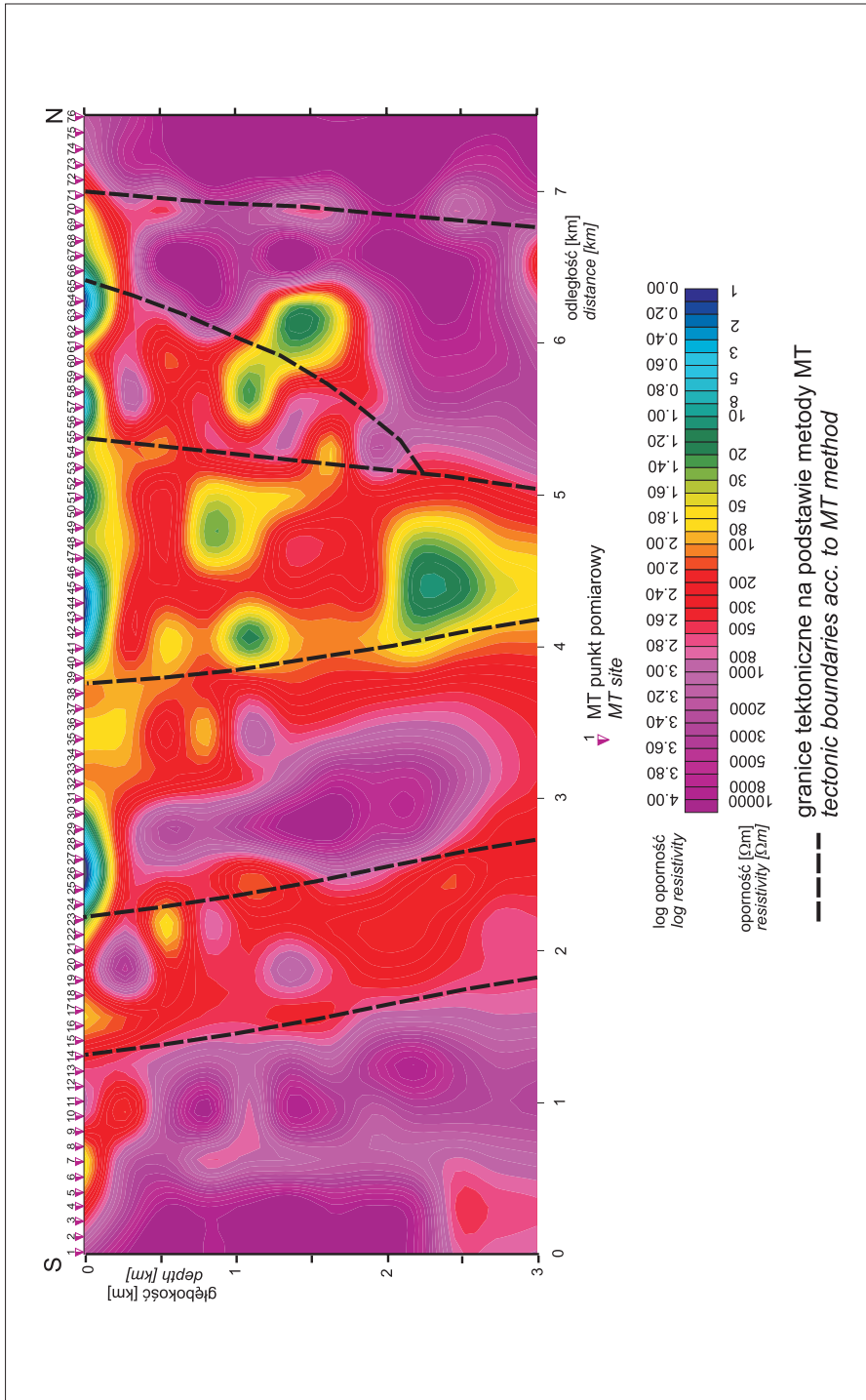


**Fig. 10.** Przekrój geoelektryczny z rejonu Cieplice-Zdroju (zakres częstotliwości 1–100 Hz)

**Fig. 10.** Geoelectrical cross-section from Cieplice-Zdrój area (frequency range 1–100 Hz)

## PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule przykłady wskazują na różnorodne możliwości efektywnego wykorzystania metody magnetotellurycznych profilowań ciągłych w badaniach strukturalnych i litologicznych. Profilowania ciągłe zapewniają możliwie najbardziej gęste opróbowanie pola magnetotellurycznego wzdłuż profilu i pozwalają w rezultacie na wykorzystanie wszystkich dostępnych obecnie procedur przetwarzania i interpretacji danych pomiarowych. Zapewniają też dobrą reprezentację statystyczną w obecności silnych zakłóceń sztucznych.



**Fig. 11.** Przekrój geoelektryczny z rejonu Polanicy-Zdroju (zakres częstotliwości 1–100 Hz)

**Fig. 11.** Geoelectrical cross-section from Polanica-Zdroj area (frequency range 1–100 Hz)

Prezentowana metoda jest w szczególności przydatna jako uzupełnienie i wspomaganie badań metodą sejsmiczną w złożonych warunkach geologicznych. Warunki takie występują na obszarze Karpat fliszowych, w strefach zaburzeń związanych z wysadami solnymi oraz w obrębie stref występowania miększych kompleksów ekranujących, trudno przenikalnych dla energii sejsmicznej warstw ewaporatów i pokryw lawowych.

Przytoczone powyżej przykłady obrazują możliwości wykorzystania metody profilowań ciągłych w tak złożonych warunkach. Potwierdzają też przydatność tej metody w badaniach tektoniki masywów krystalicznych oraz w badaniach hydrogeologicznych i geotermalnych.

*Artykuł opracowany został w ramach realizacji projektu nr 5T 12B 041 25 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Prace pomiarowe wykorzystane w prezentowanej pracy wykonane zostały przez Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych na zlecenie m.in. Polskiego Górnictwa Naftowego i Gazownictwa, Polskiej Akademii Nauk i Ministerstwa Środowiska. Autorzy dziękują kierownictwom tych instytucji za udostępnienie wyników badań. Wykorzystano też wyniki badań wykonanych w ramach prac statutowych Katedry Geologii Ogólnej, Ochrony Środowiska i Geoturystyki, umowa nr 11.11.140.447. Podziękowania należą się również Danucie Ilcewicz-Stefaniuk za okazaną pomoc.*

## LITERATURA

- Berdičevski M.H., 1968. *Elektriceskaja razvedka metodom magnetotelluriceskogo profilirovania*. Nedra, Moskwa, 1–253.
- Burtan J., 1954. *Szczegółowa mapa geologiczna Polski, arkusz Wieliczka, skala 1:50 000*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Burtan J., 1974. *Szczegółowa mapa geologiczna Polski, arkusz Mszana Dolna, skala 1:50 000*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Burtan J., Sokołowski S., Liszkowa J., Szotowa W. & Szczurowska J., 1974. Problem Karpat fliszowych i głębokiego podłoża w oknie tektonicznym Wiśniowa. *Biuletyn Instytutu Geologicznego*, 340, 1–19.
- Cagniard L., 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18, 3, 605–645.
- Czerwiński T. & Stefaniuk M., 2003. Badania magnetotelluryczne w rozpoznawaniu wglębnej budowy wysadu. W: Bujakowski W. (ed.), *Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych*, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków, 93–102.
- Czerwiński T., Klityński W., Lisowski K., Stefaniuk M. & Wojdyła M., 2002. Badania geofizyczne na wysadzie solnym „Góra” k. Inowrocławia. Dokumentacja. *Archiwum IGSMiE PAN*, Kraków, 1–51.
- Boer E. den, Eikelbom J., Driel P. van & Watts D., 2000. Resistivity imaging of shallow salt with magnetotellurics as an aid to prestack depth migration. *First Break*, 18, 19–26.

- Don B. & Don J., 1960. Geneza rowu Nysy na tle badań wykonanych w okolicach Idzikowa. *Acta Geologica Polonica*, 10, 71–106.
- Farbisz J., Farbisz E. & Stefaniuk M., 2001. Sprawozdanie z badań geofizycznych: poszukiwania wód termalnych w obszarze Polanicy-Zdroju (niepublikowane). *Archiwum PBG*, Warszawa, 1–12.
- Gamble T.D., Goubau W.M. & Clarke J., 1979. Magnetotellurics with a remote reference. *Geophysics*, 44, 53–68.
- Goldstein M.A. & Strangway D.W., 1975. Audio-frequency magnetotellurics with a grounded electric dipole source. *Geophysics*, 40, 669–683.
- Goubau W.M., Gamble T.D. & Clarke J., 1978. Magnetotelluric data analysis: removal of bias. *Geophysics*, 43, 1157–1166.
- Górecki W., Stefaniuk M., Maćkowski T., Reicher B., Śliż K., Maksym A. & Siupik J., 2004. Joint interpretation of seismic and MT data beneath the Polish Carpathians overthrust. 66th EAGE Conference & Exhibition, Paris 7–10 June 2004, *Extended Abstracts*, 1–4, P 325.
- Książkiewicz M., 1972. *Budowa geologiczna Polski. Tom IV (Tektonika). Część 3 (Karpaty)*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 1–478.
- Marks L., Ber A., Gogołek W. & Piotrowska K., 2006. *Mapa geologiczna Polski w skali 1 : 500 000*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- MT-1 Magnetotelluric System Operation Manual, version 3.2, 1996*. EMI Inc., Richmond, California, USA, 1–235.
- Ostrowski C., Stefaniuk M., Wolnowski T., Mickholz A., Targosz P., Wojdyła M. & Kosobudzka I., 2006. Gravity and Magnetotelluric Survey of Sub-Zechstein Structures in Northern Poland. 68th EAGE Conference & Exhibition, 12–15 June 2006 Vienna, *Extended Abstracts*, 1–4, P171.
- Rodi W. & Mackie R.L., 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66, 1, 174–187.
- Simpson F. & Bahr K., 2005. *Practical Magnetotellurics*. Cambridge University Press, 1–254.
- Sims W.E, Bostic F.X. Jr. & Smith H.W., 1971. The estimation of magnetotelluric impedance tensor elements from measured data. *Geophysics*, 36, 938–942.
- Stefaniuk M., 2002. Geologiczna interpretacja wyników badań magnetotellurycznych wykonanych w zachodniej części wysadu solnego „Góra”. *Archiwum IGSMiE PAN*, Kraków, 1–21 (praca niepublikowana).
- Stefaniuk M. & Ślącza A., 2002. Interpretation of the flysch cover structure with the use of magnetotelluric data based on the example of Sieklówka-Nawsie and Domaradz-Albigowa cross-sections (Polish Outer Carpathians). Proceedings of the XVIIth Congress of Carpathian-Balkan Geological Association, Bratislava September 1–4 2002, *Geologica Carpathica*, 53, Sp. Iss., 1–4.

- Stefaniuk M., Czerwiński T., Florek R., Klityński W., Wojdyła M. & Zacharski J., 2003. Study of the Carpathian flysch cover and its basement based on continuous MT profiling. 65th EAGE Conference and Exhibition, Stavanger, *Extended Abstracts*, P-151, 1–4.
- Stefaniuk M. & Czerwiński T., 2005. MT continuous profiling in structure and lithology recognition: Poland's case studies. 67th EAGE Conference & Exhibition, Madrid 13–16 June 2005, *Extended Abstracts*, 1–4.
- Strangway D.W., Swift C.M. Jr. & Holmer R.C., 1973. The application of audio-frequency magnetotellurics (AMT) to mineral exploration. *Geophysics*, 38, 1159–1175.
- Szybist A., 2003. Struktury solne rejonu kujawskiego. W: Bujakowski W. (ed.), *Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych*, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków, 15–35.
- Tichonov A.N., 1950. Ob opredelenii električeskich charakteristik glubokich sloev zemnoj kory. *Doklady AN SSSR*, 73, 2, 295–297.
- Torres-Verdin C., 1991. *Continuous profiling of magnetotelluric fields*. University of California, Berkeley, 1–97 (Ph.D. Thesis).
- Torres-Verdin C. & Bostick F.X. Jr., 1992a. Implications of the Born approximation for the magnetotelluric problem in three dimensional environments. *Geophysics*, 57, 587–602.
- Torres-Verdin C. & Bostick F.X. Jr., 1992b. Principles of spatial surface electric field filtering in magnetotellurics: Electromagnetic array profiling (EMAP). *Geophysics*, 57, 603–622.
- Wait J.R., 1962. Theory of magnetotelluric fields. *Journal of Research Radio Propagation*, 66D, 509–541.
- Żaba J., 1999. Ewolucja strukturalna utworów dolnopaleozoicznych w strefie granicznej bloków górnośląskiego i małopolskiego. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, CLXVI, 1–161.

## Summary

The magnetotelluric continuous profiling provides a specific modification of the magnetotelluric method. Its characteristic features include such a close sampling of the electric field component parallel to the measurement profile that an electric dipole length is equal to the measurement spacing. As a result, a continuous coverage of the measurement profile with electric dipoles is obtained. Sampling of the magnetic field and the electric field, which is perpendicular to the measurement profile, is much poorer. The response of the magnetic field to geological structures is smaller than that of the electric field and therefore the magnetic field is oversampled when the measurement spacing of either field is the same. The electric field measured by means of several dipoles can be referred to the magnetic field measured by a pair of sensors. Since measurement profiles are usually transverse to the geological structures, the variations of the electric component perpendicular to the profile are weaker than those parallel to it.



The foundations of the magnetotelluric continuous profiling were given by Torres-Verdin (1991) as the ElectroMagnetic Array Profiling (EMAP). It was applied to elimination of a so-called static shift of magnetotelluric curve caused by shallow 3D resistivity structures adjacent to a measurement array. The static shift is eliminated with the use of spatial filtering of MT parameters along the profile (Torres-Verdin & Bostick 1992a, b). Since other approaches for static shift elimination for single measurement site were available, the EMAP was mostly applied to relatively shallow investigations.

In Poland, shallow magnetotelluric profiling was applied to recognize zones of thermal water and mineral water filtration in areas of the Sudetes Mts. (Farbisz *et al.* 2001) and to examine the boundaries of a salt dome in central Poland (Czerwinski *et al.* 2001). In the authors' opinion, the advantages of the method does not confine to the static shift elimination alone. A relative oversampling of magnetotelluric parameters at a low frequency range results in the statistical averaging of the parameters, which is significant for noisy data. Therefore, the MT continuous profiling has been applied to recognize the structure and the lithology of deep- and medium-seated rock complexes in the Outer Carpathians and eastern Pomerania at the Polish Lowland (Fig. 1).

The complex structure of strongly deformed Carpathian flysch orogeny is a great obstacle to the reflection seismics, and hence it is necessary to apply other geophysical methods. The screening of seismic energy by high reflective Zechstein evaporates is the main problem in identifying the sub-Zechstein complexes in the Polish Lowlands area. Since evaporates do not screen the electromagnetic waves, the magnetotelluric method can be advantageously applied. The problem is that the magnetotelluric survey has lesser resolution than the reflection seismics.

Magnetotelluric measurements were taken with the use of MT-1 system of Electro-magnetic Instruments Incorporation (EMI), Richmond, California, USA. Electric dipoles,  $E_{x_i}$  of a standard 100 m length each, were oriented along the measurement profiles (Fig. 2). Electric dipoles,  $E_{y_i}$  were perpendicular to the profiles and spaced every 200–400 meters. Measurements recorded for each 600-m-long section of the profile were referred to a pair of magnetic sensors located near the centre of the section. The time series of MT field components were recorded over a frequency range of 500–0.01 Hz. A remote reference site was located at a distance of over 100 km of the study area. Data processing was made with the use of programs included in the MT-1 system. Amplitude and phase sounding curves for each electric dipole, and impedance-tensor skew and polar diagrams for pairs of  $E_{x_i}$  and  $E_{y_i}$  dipoles were results of data processing. 2D resistivity cross-sections were calculated with the use of the Bostick algorithm for continuous profiling (EMAP).

The magnetotelluric profiling method was applied in the Raciechowice – Stadniki and Hermanowa – Strzyżów – Babica areas in the Outer Carpathians (Fig. 1). Results of the investigations enabled the major structures and lithology of the flysch cover and Miocene and sub-Miocene basement to be recognized. Figures 3 and 4 show an example of a continuous cross-section from the area of the marginal zone of the Carpathian overthrust. High-resistivity rocks in the lower part of the section are connected with Mesozoic, Paleozoic and Precambrian basement. The uppermost part of the cross-section with a mosaic distribution of resistivity is built of the folded flysch cover and Miocene sediments.

The magnetotelluric continuous profiling was applied to recognise structure and lithology differentiation in salt dome “Góra” in the central part of Poland (Figs 1, 5). Resistivity of rocks of the salt dome is usually much greater than that of the surrounding medium. Hence, the vertical boundaries of the salt dome can be clearly seen in the resistivity cross-section (Fig. 6) and in resistivity maps for different depths (Fig. 7). Interpretation of small high-resistivity structures occurring near the dome in the uppermost part of the cross-section is not clear. It is possible that those structures are dome side branches, however it is more likely that they are Jurassic bioherm forms (Stefaniuk 2002).

In the Pomerania area, the MT continuous profiling was applied in the area with no seismic signal and a transition zones between good- and bad-quality seismic data. Results of MT continuous profiling showed that there was a great differentiation of sub-Zechstein formation resistivity and depth to the top of the crystalline basement (Fig. 8). This information is significant to hydrocarbon exploration projects.

Thermal water and mineral water reservoirs in the Polish Sudetes Mts. are connected with fractured carriers in magmatic and metamorphic rocks. Thus, they manifest themselves as low-resistivity zones (Farbisz *et al.* 2001). Two examples of application of magnetotelluric continuous profiling in Sudetes area are presented. The goal of the survey made close to Cieplice Zdrój was to recognise tectonic zone in magmatic rocks filtrated by thermal water (Figs 9, 10). The survey made near Polanica Zdrój revealed a fractured zone filtrated by mineral water, connected with the fault (Fig. 11).