

## STRUKTURA NASUNIĘCIA KARPACKIEGO I JEGO PODŁOŻA W POLSKICH KARPATACH ZACHODNICH W ŚWIETLE REINTERPRETACJI WYBRANYCH REGIONALNYCH PROFILI MAGNETOTELLURYCZNYCH

**The structure of the Carpathian overthrust and its basement  
in the Polish Western Carpathians in the light of reinterpretation  
of selected regional magnetotelluric profiles**

**Michał STEFANIUK<sup>1,2</sup>, Wojciech KLITYŃSKI<sup>1,2</sup>  
Jadwiga JARZYNA<sup>1</sup> & Jan GOLONKA<sup>1</sup>**

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

*<sup>2</sup>Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych, ul. Jagiellońska 76, 03-301 Warszawa;  
e-mail: stefan@geol.agh.edu.pl, gpklityn@geol.agh.edu.pl, jarzyrna@uci.agh.edu.pl,  
jan\_golonka@yahoo.com*

**Treść:** Przedmiotem artykułu są wyniki reinterpretacji trzech regionalnych profili magnetotellurycznych zlokalizowanych w polskich Karpatach Zachodnich. Badania magnetotelluryczne w tym obszarze wykonało Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych w Warszawie w latach 1997–2002. Prace reinterpretacyjne poprzedzone zostały przez analizę danych pomiarowych i ich reprocessing dla wybranych sondowań. W reinterpretacji wykorzystano głównie automatyczną inwersję 2D oraz inwersję 1D przy użyciu algorytmów Occama i LSQ. Dwuwymiarowe przekroje oporności opracowane na podstawie wyników automatycznej inwersji 2D oraz interpretacji 1D wykorzystano do konstrukcji modeli geoelektryczno-geologicznych. W interpretacji geologicznej wykorzystano także informacje geologiczne i wiertnicze oraz dane sejsmiki refleksyjnej.

**Słowa kluczowe:** Karpaty Zachodnie, badania regionalne, sondowania magnetotelluryczne, podłoże, tektonika

**Abstract:** The subject of the paper includes results of reinterpretation of three regional magnetotelluric profiles located in the western part of the Polish Carpathians. Magnetotelluric survey in the area was made by the Geophysical Exploration Company, Warsaw, in the years 1997–2002. Reinterpretation works were preceded by analysis of measurement data and reprocessing for some soundings. Automatic 2D inversion and 1D inversion with the use of Occam and LSQ algorithms were employed in reinterpretation process. 2D resistivity sections obtained based on results of automatic 2D and 1D data interpretation were used to construct geoelectric and geologic models. Geological and borehole data, and reflection seismic data were also applied in geological interpretation.

**Key words:** Western Carpathians, regional survey, magnetotelluric sounding, basement, tectonics

## WSTĘP

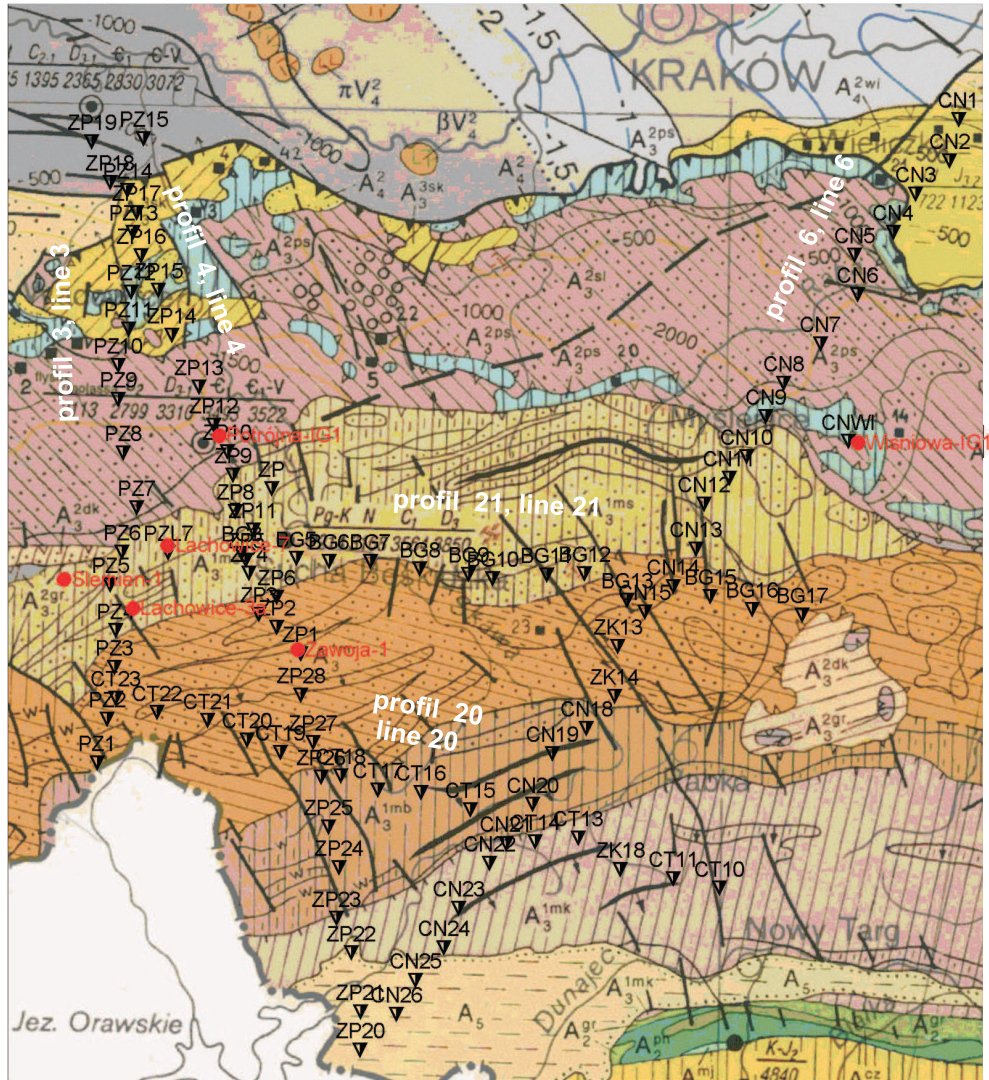
Tematem prezentowanego artykułu są wyniki reinterpretacji badań magnetotellurycznych wykonane dla trzech regionalnych profili zlokalizowanych w polskich Karpatach Zachodnich. Nowoczesne badania magnetotelluryczne w Karpatach wykonywane są od 1997 roku przez Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych, z wykorzystaniem systemu MT-1 produkcji amerykańskiej firmy Electromagnetic Instruments Inc. z Richmond w Kalifornii. Prace regionalne w zachodniej części Karpat wykonane zostały w latach 1998–2002 w ramach realizacji „Projektu badań magnetotellurycznych w Karpatach” (Pepel *et al.* 1997). W tym obszarze zrealizowano pomiary magnetotelluryczne i ich interpretację na sześciu profilach biegnących w przybliżeniu poprzecznie do rozciągłości wychodni fliszowych i na dwóch profilach biegnących generalnie zgodnie z ich rozciągłością (Fig. 1). Profile poprzeczne to: Przyborów – Zator (nr 3), Chyżne – Spytkowice (nr 4), Chyżne – Niepołomice (nr 6), Zakopane – Kraków (nr 5), Bukowina Tatrzańska – Niepołomice (nr 7) oraz Szczawnica – Bochnia (nr 8). Dwa pozostałe profile mające charakter wiążący to profile: Cieszyn – Nowy Targ (nr 20) i Bielsko-Biała – Grybów (nr 21).

Przedmiotem reinterpretacji były profile: Przyborów – Zator (nr 3), zorientowany południkowo, Chyżne – Spytkowice (nr 4), którego azymut wynosi  $340^\circ$ , oraz Chyżne – Niepołomice (nr 6), którego azymut wynosi ok.  $35^\circ$ . Wybór profili podyktowany był lokalizacją obszaru będącego przedmiotem badań realizowanych w ramach projektu badawczego nr 4T12 B 025 28. Profil Chyżne – Niepołomice, w północno-wschodnim odcinku odbiega znacząco od tego obszaru, położony jest jednak wzdłuż regionalnego profilu sejsmiki refrakcyjnej nr 3, wykonanego w ramach projektu „Celebration”. Pomiary wzdłuż profili wykonano w punktach sondowań odległych od siebie o około 3 km. W środkowym fragmencie profilu Chyżne – Spytkowice (nr 4) odległość punktów pomiarowych wynosi około 1.5 km (Stefaniuk *et al.* 1998b). Wyniki wykonanych badań przedstawione zostały w dwu zbiorczych dokumentacjach (Stefaniuk *et al.* 1999, 2001). Były też przedmiot szeregu referatów i artykułów naukowych (Stefaniuk *et al.* 1998a, Klityński & Stefaniuk 2000, Czerwiński *et al.* 2000, 2003).

W ostatnich latach obserwuje się szybki rozwój metod przetwarzania danych magnetotellurycznych, szczególnie danych zakłóconych, a także znaczący postęp w zakresie ich interpretacji geofizycznej i geologicznej. Upowszechniło się wykorzystanie dwuwymiarowych modeli interpretacyjnych oraz automatycznej inwersji 2D. Coraz szerzej próbuje się stosować modele interpretacyjne 3D. W tej sytuacji przetwarzanie danych wykonane przed pięcioma laty wymaga weryfikacji z zastosowaniem nowych procedur processingowych. Niezbędne jest też uzupełnienie interpretacji z wykorzystaniem bardziej złożonych modeli i najnowszych programów interpretacyjnych.

Głównym zadaniem badań MT było rozpoznanie podłoża Karpat, w tym wydzielenie podłoża paleozoicznego, podłoża mezozoicznego, a także głębokiego podłoża prekambryjskiego. Interpretacja badań MT pozwoliła, w pewnym stopniu, na rozpoznanie struktury Karpat fliszowych, w tym stref kontaktów poszczególnych płaszczowin oraz określenie miąższości orogenu karpackiego. Określone zostało położenie stref tektonicznych, jak również wyznaczono obszary podniesione i strefy depresyjne w stropie podłoża. W przypadku profili zachodnich: Przyborów – Zator (nr 3) oraz Chyżne – Spytkowice (nr 4), czy północnej części obszaru badań, gdzie rozpoznanie otworami jest dosyć dobre a gęstość sondowań większa,

wiarygodność określenia przebiegu granic utworów mezozoicno-paleozoicznych i prekambryjskich jest duża. W pozostałych częściach obszaru badań wyniki interpretacji obciążone są często trudnym do oceny błędem.



- ▼ Zp20 – sondowanie MT nr 20 z profilu nr 4 (zp)      ● Zawoja-1 otwór wiertniczy Zawoja-1  
 Zp20 – MT site no 20, line no 4 (zp)                      Zawoja-1 borehole

**Fig. 1.** Lokalizacja sondowań magnetotellurycznych w Karpatach Zachodnich na tle powierzchniowej mapy geologicznej

**Fig. 1.** Location of magnetotelluric sounding sites in the Western Carpathians at the background of surface geological map

## METODYKA BADAŃ

Podstawowe problemy realizacji badań magnetotellurycznych związane są z obecnością sztucznych zakłóceń elektromagnetycznych oraz tzw. zaburzeń galwanicznych krzywych sondowań. Obecność sztucznych pól elektromagnetycznych o narastającej intensywności, zakłócających sygnał użyteczny, jest pierwszoplanowym problemem w badaniach elektromagnetycznych zwłaszcza wykorzystujących relatywnie słabe pola naturalne. Zaburzenia galwaniczne wywołwane są przez niejednorodny rozkład oporności w strefie przypowierzchniowej i w obrębie układu pomiarowego (Jones 1988, Sternberg *et al.* 1988). W zachodniej części Karpat polskich obydwie te czynniki odgrywają podstawową rolę. Intensywne zakłócenia elektromagnetyczne związane są z obecnością sieci zelektryfikowanych linii kolejowych oraz gęstą zabudową dolin rzecznych, a więc terenów stosunkowo łatwo dostępnych dla prac pomiarowych. Przesunięcie statyczne pojawia się z reguły w obrębie wychodni wysokooporowych kompleksów piaskowcowych jednostki magurskiej i śląskiej.

Wpływ zakłóceń elektromagnetycznych i przesunięcie statyczne stawiają pod znakiem zapytania wiarygodność interpretacji wcześniejszych danych magnetotellurycznych w omawianym obszarze, zarejestrowanych jednopunktowo aparaturą o niskim zakresie częstotliwości (Stefaniuk 2003).

### Prace polowe

Prace pomiarowe wykonane zostały według standardu wypracowanego dla obszaru Karpat, z wykorzystaniem systemu pomiarowo-interpretacyjnego MT-1 (Stefaniuk *et al.* 1998b, Stefaniuk 2000, 2003). Zastosowanie powyższego systemu pozwala na złagodzenie wpływu sztucznych zakłóceń elektromagnetycznych poprzez wykorzystanie referencyjnego pomiaru i referencyjnego przetwarzania danych. Pozwala także na ograniczenie oddziaływania zaburzeń galwanicznych.

Dwupunktowy pomiar referencyjny polega na synchronicznej rejestracji składowych magnetycznych na punkcie pomiarowym i tzw. punkcie referencyjnym, w założeniu wolnym od zakłóceń. Pozwala on poprzez zastosowanie odpowiednich procedur przetwarzania danych na eliminację nie skorelowanych przestrzennie sygnałów zakłócających (Gamble *et al.* 1978, Stefaniuk 2003). Problemem pozostaje określenie właściwej odległości punktów polowych od punktu referencyjnego. Powinna ona być tak duża, aby na punkcie referencyjnym nie zaznaczały się zakłócenia obserwowane na punkcie polowym. Z drugiej strony, poziome składowe magnetyczne pola magnetotellurycznego, rejestrowane na obydwu punktach, powinny być koherentne (Shalivahan & Bhattacharya 2002).

Pomiary wykonane w zachodniej części Karpat polskich odniesione były do punktów referencyjnych, zlokalizowanych w pobliżu miejscowości Limanowa, Żyznów i Berezka k. Polańczyka. Odległości punktów referencyjnych od punktów pomiarowych mieściły się w granicach 50÷150 km.

Analizę przesunięcia statycznego i uniknięcie jego wpływu umożliwia wykonywanie krótkich profili ciągłych w punkcie sondowania (Stefaniuk *et al.* 1998a, Stefaniuk 2000). Układ pomiarowy w punkcie polowym składał się z czterech par wzajemnie prostopadłych dipoli elektrycznych  $E_{x_i}$ ,  $E_{y_i}$ , oraz pary czujników magnetycznych  $H_x$ ,  $H_y$  lokalizowanych

w pobliżu środka linii dipoli elektrycznych. Dipole elektryczne o długości w założeniu 100 m zbudowane były z kabla telefonicznego i uziemień w postaci pary elektrod nie polaryzujących Cu/CuSO<sub>4</sub>. Linia utworzona przez dipole  $E_{xi}$  zorientowana była poprzecznie do rozciągłości struktur geologicznych. Składowe magnetyczne rejestrowano za pomocą czujników indukcyjnych.

Stosując powyższy układ pomiarowy rejestruje się na punkcie połowym osiem składowych elektrycznych i dwie poziome składowe magnetyczne. Dwie poziome składowe magnetyczne rejestrowane były ponadto na punkcie referencyjnym. Rejestracje wykonano w zakresie częstotliwości 500±0.001 Hz niezależnie w trzech lub czterech przedziałach o częstotliwościach próbkowania odpowiednio: 500 Hz, 32 Hz, 5 Hz i 1 Hz. Przebiegi czasowe dla niższych częstotliwości obliczone zostały przy zastosowaniu tzw. decymacji, czyli wydłużenia kroku próbkowania poprzez wybieranie np. co 2, 4, 8, 16 próbek. W paśmie 500±75 Hz rejestrowano uśrednione współczynniki spektralne w tzw. trybie SD-mode (*MT-1 Operation Manual 1996*). Czas rejestracji wynosił około 36 godzin dla każdego punktu pomiarowego, był jednak wydłużany dla wybranych sondowań, w zależności od warunków pomiarowych.

### Przetwarzanie danych

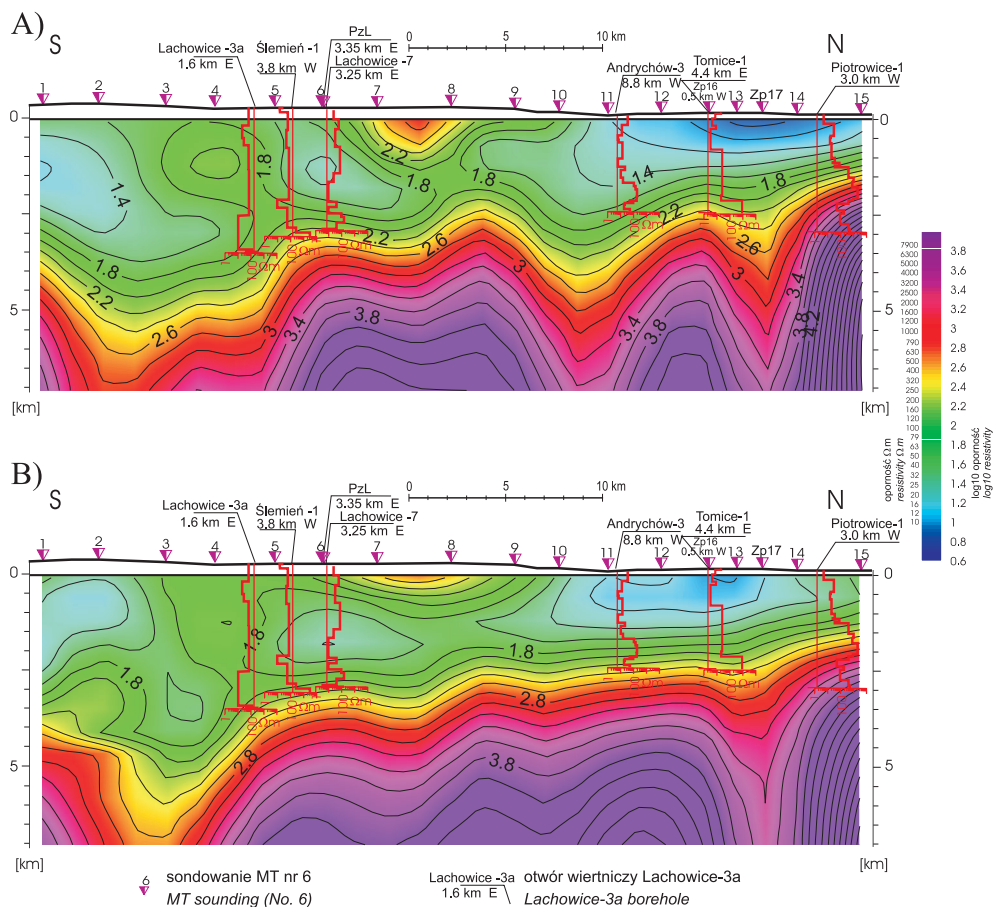
Zarejestrowane przebiegi czasowe były przedmiotem wielostopniowego processingu numerycznego. Istotną rolę w przetwarzaniu danych odgrywa selekcja danych pomiarowych, polegająca na eliminacji odcinków silnie zakłóconych, pozbawionych wariacji quasi-sinusoidalnych lub wykazujących brak koherencji pomiędzy odpowiednimi kanałami pomiarowymi (Stefaniuk *et al.* 1997, Stefaniuk 2003). Wyselekcjonowane przebiegi czasowe przetworzone zostały za pomocą procedur processingu referencyjnego, który pozwala na eliminację lub złagodzenie wpływu zakłóceń o zmiennej charakterystyce przestrzennej (*MT-1 Operation Manual 1996*).

Obliczone zostały składowe tensora impedancji, wiążące zmienne pole elektryczne i magnetyczne na powierzchni ziemi (Berdičevski 1968). Posłużyły one do konstrukcji tzw. diagramów kierunkowych impedancji dla wybranych okresów, obrazujących zależność modułu tensora impedancji od orientacji składowej elektrycznej. Na podstawie składowych  $Z_{xy}$  i  $Z_{yx}$  tensora impedancji obliczono krzywe amplitudowe i fazowe sondowań magnetotellurycznych. Określono ponadto tzw. skośność tensora impedancji (ang. *skew*), która podobnie jak diagramy biegunowe impedancji jest miarą złożoności ośrodka geoelektrycznego, tj. jego trójwymiarowości.

W ramach reprocessingu danych pomiarowych wykonano przegląd i analizę wyników wcześniejszych obliczeń, w szczególności sprawdzono dokładność synchronizacji rejestracji połowych i referencyjnych. Błędy w synchronizacji przebiegów czasowych powodują zwiększenie rozrzutu statystycznego obliczonych parametrów magnetotellurycznych zwłaszcza dla wysokich częstotliwości, dla których wzajemne przesunięcia momentu startu rejestracji poszczególnych zespołów systemu mogą być wielokrotnie większe od kroku próbkowania, a nawet porównywalne z długością podstawowego bloku rejestracyjnego. Dla wyselekcjonowanych sondowań zakłóconych w wysokim stopniu wykonano reprocessing typu „robust” (Larsen *et al.* 1996).

## Interpretacja geofizyczna

Wyniki przetwarzania danych, tj. krzywe sondowań amplitudowe i fazowe, diagramy biegunowe impedancji i inne parametry magnetotelluryczne, stworzyły podstawowy zbiór wykorzystywany w interpretacji jakościowej i ilościowej.



**Fig. 2.** Przekroje izoomów wg metody Occama wzdłuż profilu Przyborów – Zator (nr 3); A) polaryzacja XY, B) Polaryzacja YX. Czerwonymi liniami zaznaczono schematycznie zmiany oporności pozornej w otworach

**Fig. 2.** Resistivity cross sections according to Occam method, along the line Przyborów – Zator (No. 3); A) TM mode – XY, B) TE mode – YX. Red lines mean the schematic resistivity logs in boreholes

**Interpretacja jakościowa** polegała na ogólnej ocenie charakteru ośrodka geoelektrycznego, głównie w aspekcie określenia stopnia jego złożoności (1D, 2D, 3D) oraz występowania zaburzeń galwanicznych. Analiza zmienności krzywych sondowań dla pojedynczego punktu pomiarowego pozwala na wybór krzywej o najlepszej jakości w najmniejszym stopniu zabu-

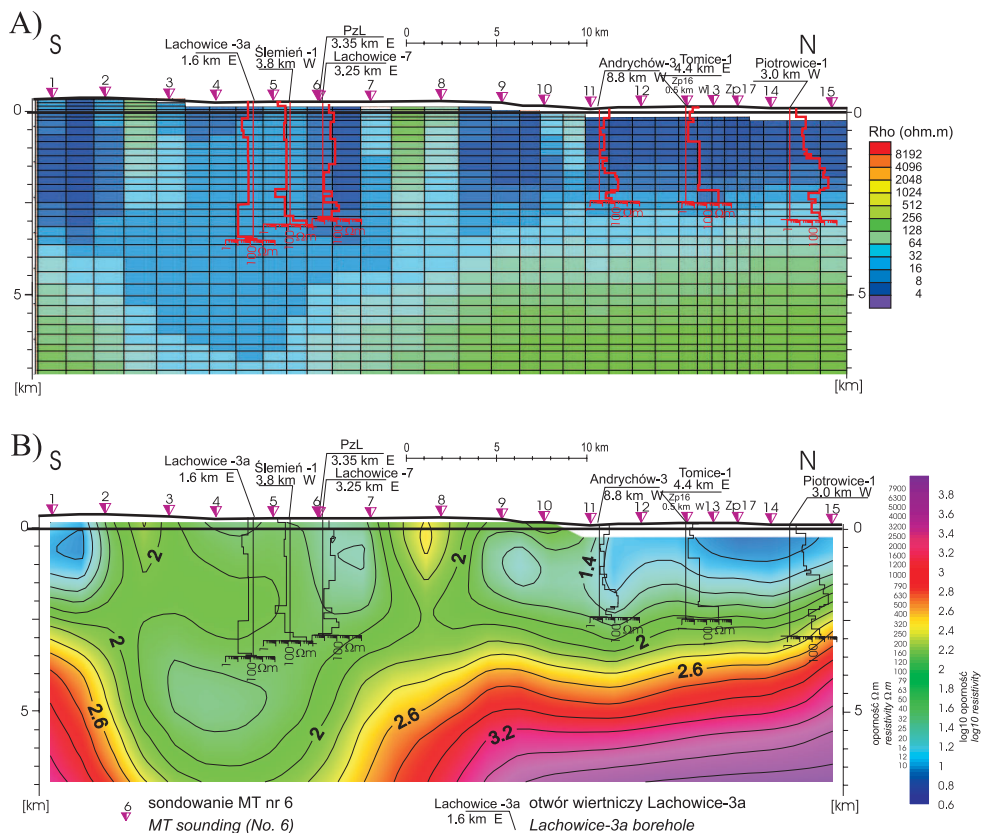
rzonej przez niejednorodności przypowierzchniowe i zakłócenia elektromagnetyczne. Rozbieżność krzywych dla polaryzacji elektrycznej i magnetycznej w tym samym punkcie pomiarowym, informuje o stopniu złożoności budowy geologicznej, tj. czy mamy do czynienia z ośrodkiem jedno-, dwu- czy trójwymiarowym (Stefaniuk *et al.* 1997, Stefaniuk 2003). Duże, w porównaniu z impedancjami głównymi ( $Z_{xy}$ ,  $Z_{yx}$ ) wartości impedancji pobocznych ( $Z_{xx}$ ,  $Z_{yy}$ ) uwidocznione na diagramach kierunkowych świadczą o trójwymiarowości ośrodka geoelektrycznego, podobnie jak charakterystyczne skrócenie kierunku dłuższych osi diagramów impedancji informujące o zmienności planów strukturalnych na różnych poziomach. Skośność tensora impedancji (*skew*) jest w istocie liczbowym przedstawieniem informacji zawartej w diagramach biegunowych, pozbawionym jednak orientacji przestrzennej kierunków strukturalnych (Stefaniuk 2003).

Geofizyczna **interpretacja ilościowa** polegała na określeniu modelu geometryczno-opornościowego ośrodka geologicznego, generującego krzywe sondowań zgodne z danymi pomiarowymi. Podstawą interpretacji ilościowej była automatyczna inwersja 2D z wykorzystaniem algorytmu NLCG – nieliniowych gradientów sprzężonych (ang. *Non-Linear Conjugate Gradients*, Rodi & Mackie 2001). Wykorzystano także reinterpetację 1D krzywych sondowań za pomocą algorytmów: Occama i LSQ. Zagadnienia metodyczne prac interpretacyjnych przedstawione zostały na przykładzie profilu Przyborów – Zator (nr 3).

Pierwszym etapem interpretacji ilościowej były obliczenia automatycznych inwersji 1D tzw. metodą Occama oraz inwersji 2D metodą NLCG dla modelu startowego w postaci jednorodnej półprzestrzeni. Algorytm Occama jest to numeryczna procedura automatycznie dopasowująca płasko-równoległy model geoelektryczny do pary krzywych sondowania – amplitudowej i fazowej (Constable *et al.* 1987, de Groot-Hedlin & Constable 1990). Model startowy zakładany jest automatycznie przy zadanej ilości warstw przypadających na dekadę logarymiczną głębokości. Miąższość warstw rośnie regularnie z głębokością zgodnie z logiką skali logarymicznej. Ingerencja interpretatora w proces zakładania modelu startowego i obliczeń jest więc minimalna, co powoduje wysoki stopień obiektywności wyników. W rezultacie inwersji uzyskuje się model wygładzony o minimalnym kontraście oporności. Na podstawie zestawienia wyników inwersji Occama dla krzywych polaryzacji XY i YX obliczone zostały odpowiednie przekroje oporności (Fig. 2). Zróżnicowanie tych przekrojów jest dobrą miarą anizotropii ośrodka geoelektrycznego przy założeniu, że elektryczne dipole pomiarowe zorientowane są zgodnie (YX) i poprzecznie (XY) względem rozciągłości wychodni fliszowych.

Podobnie wysoki stopień obiektywności osiągają rezultaty inwersji 2D z wykorzystaniem metody algorytmu optymalizującego, bazującego na metodzie nieliniowych gradientów sprzężonych i jednorodnej półprzestrzeni jako modelu startowego. W tej sytuacji ingerencja interpretatora ogranicza się w praktyce do wprowadzenia oporności jednorodnej półprzestrzeni, założonego poziomu dopasowania i ilości iteracji. Tak określona inwersja 2D daje jednak dosyć przypadkowe wyniki mieszczące się w szerokim zakresie ekwiwalencji rozwiązania dwuwymiarowego. Nie są one z reguły przydatne w rozwiązywaniu problemów geologicznych. Bardziej skuteczne jest w tym względzie wykorzystanie modelu startowego bliskiego rzeczywistemu rozkładowi oporności w ośrodku geologicznym i narzucenie ograniczeń na zmianę parametrów modelu w procesie inwersji, czyli tzw. więzów (Stefaniuk *et al.* 2007). Do konstrukcji więzów wykorzystuje się np. informacje *a priori* odnoszące się do położenia

granic opornościowych i oporności warstw określonych w otworach wiertniczych, wiarygodnie określone granice sejsmiczne itp. Przekrój geoelektryczny określony za pomocą inwersji 2D przedstawia figura 3.



**Fig. 3.** Rezultat inwersji 2D metodą NLCG dla polaryzacji magnetycznej i elektrycznej dla krzywych amplitudowych i fazowych. Profil Przyborów – Zator (nr 3); model startowy – jednorodna półprzeźrość; A) model w postaci siatki elementów skończonych, B) przekrój interpolowany

**Fig. 3.** Result of 2D inversion with NLCG method for TM and TE modes and amplitude and phase curves; line Przyborów – Zator (No. 3); starting model – uniform half-space; A) model of finite elements mesh, B) interpolated section

Wyniki inwersji przedstawione są w postaci „surowego” modelu złożonego z prostokątnych elementów skończonych (Fig. 3A) oraz „wygładzonego” rozkładu oporności (Fig. 3B). Każdy ze sposobów wizualizacji uwypukla inne cechy rozkładu oporności w przekroju. Rozkład wygładzony podkreśla strefy o silnych gradientach oporności i dobrze odzwierciedla granice pionowe. W interpretacji geologicznej bardziej przydatny jest jednak model „kostkowy” dający interpretatorowi możliwość intuicyjnego poprowadzenia granic geologicznych oraz korekty numerycznych artefaktów i efektów wywołanych np. przez zakłócenia elektromagnetyczne i zaburzenia galwaniczne.



Dyskusyjne pozostaje zastosowanie jednowymiarowych modeli interpretacyjnych w interpretacji sondowań magnetotellurycznych. Od kilkunastu lat w środowisku specjalistów dominuje pogląd, że modele 2D lepiej odzwierciedlają rzeczywisty, trójwymiarowy rozkład oporności niż modele 1D. Biorąc jednak pod uwagę szeroki zakres ekwiwalencji modeli dwuwymiarowych oraz błędy numeryczne wynikające ze specyficznych, asymptotycznych rozwiązań równania dyfuzji dla teoretycznego ośrodka 2D, inwersja 1D może dostarczyć rezultatów dobrze odzwierciedlających zróżnicowanie ośrodka geologicznego (Fig. 4). W szczególności inwersja 1D jest niezbędna w interpretacji tzw. sondowań parametrycznych wykonanych w pobliżu otworów wiertniczych, która pozwala na powiązanie kompleksów geoelektrycznych i geologicznych, a więc spełnia podstawową rolę w interpretacji geologicznej. W interpretacji sondowań parametrycznych stosowano, także w ograniczonym zakresie, modelowanie proste 1D, głównie do obliczenia krzywych dla modeli konstruowanych na podstawie interpretacji profilowań geofizyki otworowej.

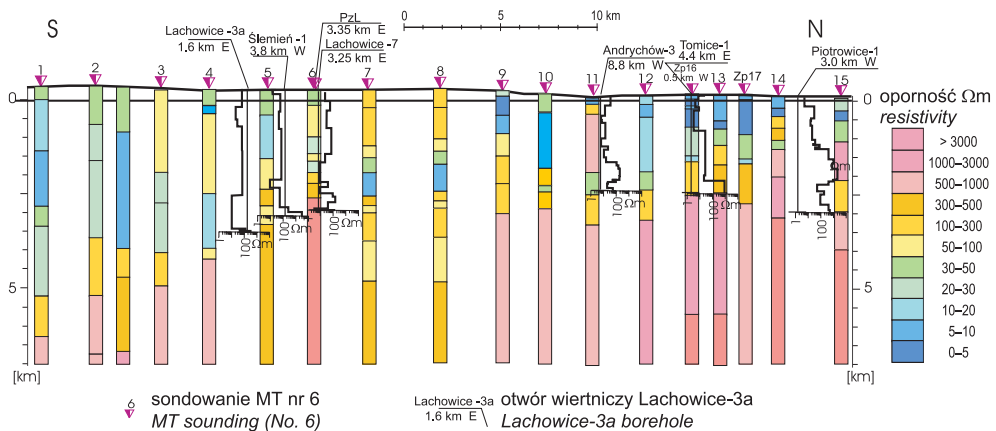


Fig. 4. Wyniki interpretacji 1D wg LSQ wzdłuż profilu Przyborów – Zator (nr 3)

Fig. 4. Results of 1D inversion (according to LSQ method). Line: Przyborów – Zator (No. 3)

### Sondowania parametryczne

Sondowania parametryczne wykonuje się w celu określenia najbardziej prawdopodobnego układu warstw w ośrodku geoelektrycznym, weryfikacji interpretacji ilościowej oraz powiązania kompleksów geologicznych, litologicznych lub stratygraficznych z interpretowanymi warstwami geoelektrycznymi (Stefaniuk 2003). Interpretacja sondowania parametrycznego polega na opracowaniu modelu geoelektrycznego 1D na podstawie profilowań oporności w otworach wiertniczych lub innych danych geofizycznych, obliczeniu krzywych sondowania dla takiego modelu i następnie porównaniu tych krzywych z krzywymi pomiarowymi (Fig. 5, 6). Rozbieżności pomiędzy wynikami pomiarów i krzywymi modelowymi są miarą wpływu braku jednowymiarowości ośrodka geoelektrycznego i/lub obecności zakłóceń elektromagnetycznych.

Kolejnym krokiem w analizie sondowania parametrycznego jest ilościowa interpretacja krzywych modelowych i pomiarowych. Pozwala ona na określenie, które warstwy geoelek-

tryczne i geologiczne zaznaczają się na krzywej oraz na ocenę ekwiwalencji interpretowanych parametrów ilościowych. Sondowania parametryczne są podstawą dowiązania wyników interpretacji geofizycznej do sytuacji geologicznej oraz stanowią weryfikację jej wiarygodności (Miecznik *et al.* 1995, Stefaniuk 2003).

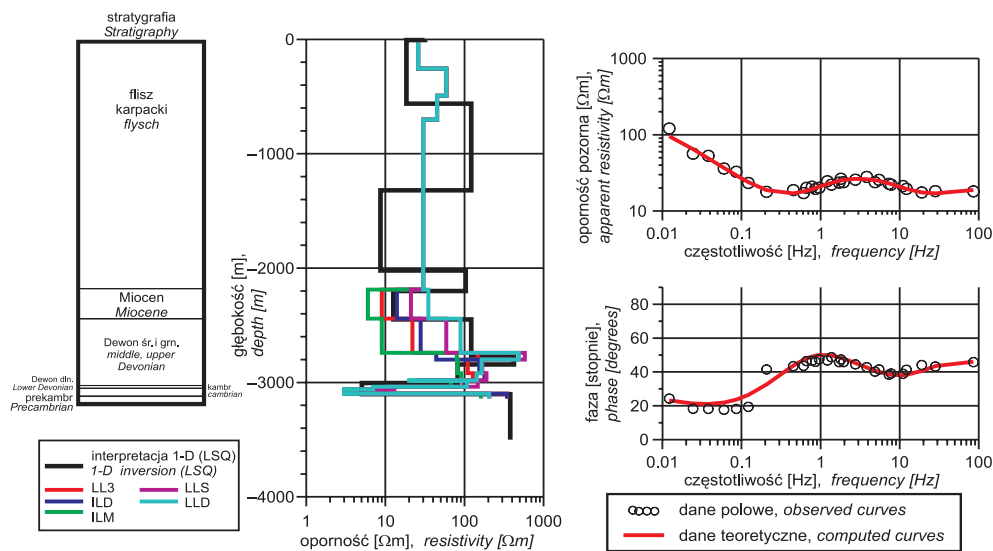


Fig. 5. Sondowanie parametryczne na otworze wiertniczym Lachowice 7

Fig. 5. Parametric sounding made close to borehole Lachowice 7

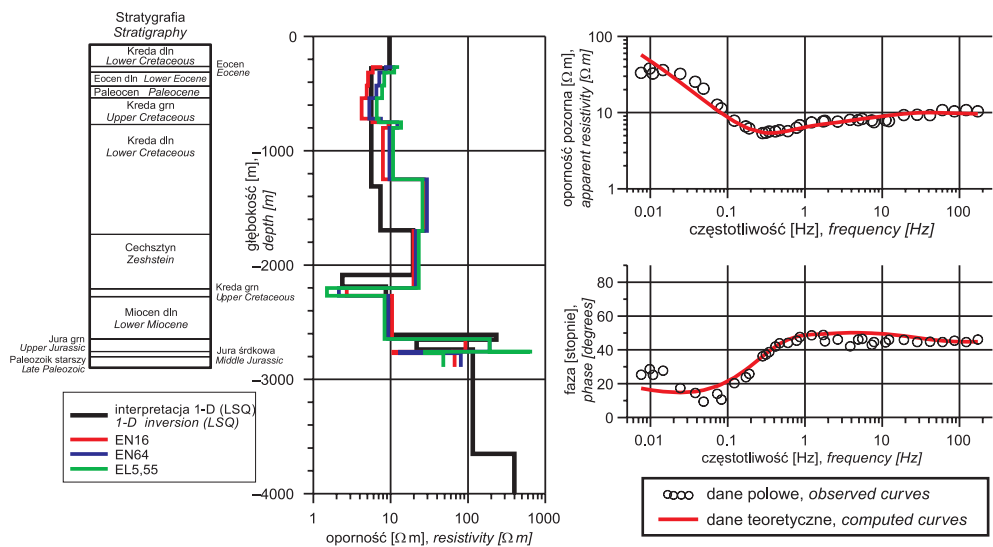


Fig. 6. Sondowanie parametryczne na otworze wiertniczym Wiśniowa IG 1

Fig. 6. Parametric sounding made close to borehole Wiśniowa IG 1

Odrębnym problemem jest ocena związku oporności pozornych i granic geoelektrycznych wyinterpretowanych na podstawie otworowych profilowań oporności i krzywych sondowań magnetotellurycznych. W otworach wiertniczych pochodzących z różnych okresów czasu wykonywane były różne zestawy profilowań oporności (klasyczne – potencjałowe i gradientowe, sterowane (laterologi), indukcyjne). Oporności pozorne uzyskane podczas pomiarów różnorodnymi sondami otworowymi czasami znacząco różnią się między sobą (Fig. 5 i 6). W omawianym przypadku wyniki najbardziej zbliżone do oporności wyinterpretowanych z krzywych sondowań magnetotellurycznych uzyskano za pomocą długich sond potencjałowych i laterologów dalekiego zasięgu.

Oporność pozorną zarejestrowaną różnymi sondami w otworze Lachowice 7 zestawiono z wynikiem interpretacji 1D pobliskiego sondowania magnetotellurycznego. Widać wyraźnie w dolnej części otworu, poniżej 2442 m, że wartości oporności pozornej, będące wynikami rejestracji różnymi sondami, uśrednione w kompleksach litostratygraficznych, są zróżnicowane. W górnej części otworu, gdzie występują utwory fliszowe, dysponowano jedynie wynikiem pomiaru klasyczną sondą potencjałową EN64 (o długości 1.62 m). Oporność pozorna w tym interwale mieści się między 6 a 70 omm. Zróżnicowanie oporności, a także innych parametrów, jest związane z wykształceniem litologicznym i wiekiem badanych kompleksów skalnych. W tabeli 1 podano wartość średnią oporności pozornej dla kompleksu fliszowego (27÷2188 m) oraz wartości oporności dla wydzielonych warstw pośrednich. Podobnie postąpiono dla utworów miocenu (2442÷2740 m), podając średnią wartość dla całego kompleksu oraz oporności pozorne dodatkowych dwóch warstw. Takie podziały wykorzystano podczas interpretacji sondowań parametrycznych w celu wyboru najlepszego modelu zmian oporności pozornej. Większa liczba profilowań oporności wykonanych w dolnym interwale pomiarowym (2570÷3140 m) umożliwia dokładniejsze dopasowanie oporności pozornych z otworowych profilowań do wyników interpretacji MT. Dokładniejsze rozwarstwienie badanych formacji, zgodne ze szczegółowym podziałem stratygraficznym (Zacharski *et al.* 2006), także ułatwia wzajemne powiązanie wyników badań MT i geofizyki otworowej. Na figurze 5 znajdują się również wykresy oporności pozornej i fazy będące wynikiem pomiarów polowych oraz dane teoretyczne dla badań magnetotellurycznych. Obserwuje się wyraźną zgodność obu rodzajów danych. Zatem, wynik interpretacji sondowania magnetotellurycznego jest wiarygodny, mimo nie w pełni zadowalającej zgodności oporności pozornych. Najlepsze dopasowanie do wyniku interpretacji 1D obserwuje się dla oporności pozornej zarejestrowanej sondą sterowaną dalekiego zasięgu, LLD.

Podobny zestaw wykresów znajduje się na figurze 6 dla otworu Wiśniowa IG1. Oporności pozorne zarejestrowane trzema sondami klasycznymi o zróżnicowanym zasięgu radialnym są do siebie bardzo zbliżone (Fig. 7). Zmienność oporności pozornych związana jest z litologią. Dla danych z otworu Wiśniowa IG1 obserwuje się wyraźną zgodność wyniku interpretacji 1D i uśrednionych wartości oporności pozornych zarejestrowanych sondami klasycznymi o różnym zasięgu radialnym.

Obserwowane rozbieżności w położeniu granic opornościowych i wielkości oporności związane są także z zasadniczą różnicą rozdzielczości sondowań powierzchniowych i danych otworowych. Istotny, zwłaszcza w obszarze intensywnej tektoniki fałdowej, może być czynnik strukturalny. Oporności wyinterpretowane z profilowań otworowych odnoszą się do strefy przyotworowej i mierzone są wzdłuż otworu.

**Tabela (Table) 1**

Wyniki profilowań geofizyki otworowej uśrednione w wydzielonych warstwach w otworze Lachowice 7  
*Results of well logging averaged in selected layers in Lachowice 7 well*

Strop Top [m]	Spąg Bottom [m]	h [m]	Symbol Code	Opis litologiczny Lithology	EN64 [omm]	LL3 [omm]	GR [API]	NPHI [%]	DT [us/m]
5	27	22	FKN	piaskowce, ilowce, mulowce sandstone, claystone, mudstone				21	219
27	2188	2161	FKN		30		82	15	297
<b>27</b>	<b>256</b>	229	FKN		<b>26</b>				
<b>256</b>	<b>493</b>	237	FKN		<b>59</b>				
<b>493</b>	<b>702</b>	209	FKN		<b>45</b>				
2188	2442	254	FKN		9	9	82	15	251
<b>2188</b>	<b>2342</b>	154	FKN		<b>7</b>				
<b>2342</b>	<b>2442</b>	100	FKN		<b>22</b>				
2442	2740	298	M	mulowce, piaskowce, mudstone, sandstone		22	72	12	211
<b>2442</b>	<b>2570</b>	128	M						
<b>2570</b>	<b>2740</b>	170	M						
2740	2800	60	D2+D3 6						
2800	2918	118	D2+D3 5						
2918	2982	64	D2+D3 4						
2982	2985	3	D2+D3 3						
2985	3036	51	D2+D3 2						
3036	3060	24	D1						
3060	3098	38	Cm						
3098	3140	42	Pz1+Pr						

FKN – flisz karpaccy, the Carpathian flysch; M – miocen, Miocene, D2+D3 6... D2+D3 2 – dewon środkowy i górny (podział wg Zacharski *et al.* 2006), Upper and Middle Devonian *acc. to Zacharski et al. 2006*); D1 – dewon dolny, Lower Devonian; Cm – kambry, Cambrian; Pz1+Pr – prekambry, Precambrian; EN64 – sonda potencjalowa o długości 1.62 m, Normal resistivity log 1.62 m; LL3 – sonda sterowana, laterolog; GR – profilowanie gamma, Gamma Ray; NPHI – porowatość neutronowa, Neutron porosity; DT – czas interwału, Transit interval time; ILLD, ILM – wyniki profilowania oporności sondami indukcyjnymi dalekiego i średniego zasięgu, Resistivity from induction logs, deep and medium, respectively; LLD, LLS – wyniki profilowania oporności laterologami dalekiego i średniego zasięgu, Resistivity from laterologs, deep and shallow, respectively; h – miąższość, thickness

Jedynie sondy najdłuższe mają zasięgi radialne wykraczające poza strefę filtracji. Oporności wyznaczone z pomiarów magnetotellurycznych mają charakter oporności wzdłużnych mierzonych poziomo i są wrażliwe na nachylenie i zafałdowania warstw o zróżnicowanych parametrach w strefie o znacznie większej objętości.

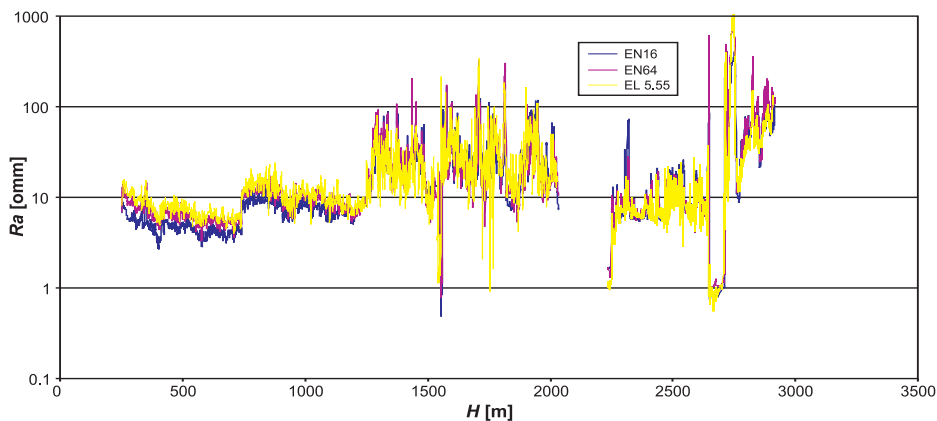


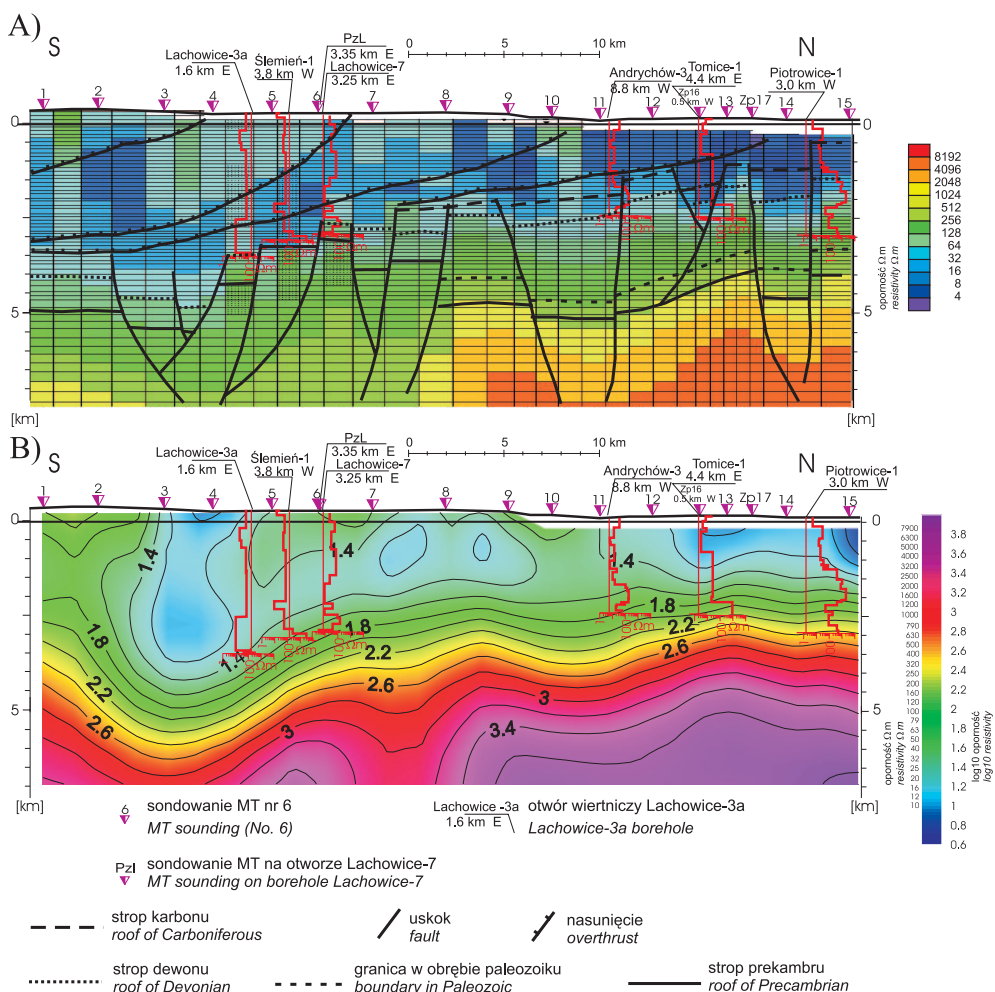
Fig. 7. Trzy profilowania oporności zarejestrowane w otworze Wiśniowa IG1

Fig. 7. Three resistivity logs measured in Wiśniowa IG1 well

### Interpretacja geologiczna

Zadaniem interpretacji geologicznej było określenie położenia granic litostratygicznych i tektonicznych znajdujących odzwierciedlenie w odpowiednich kontrastach opornościowych oraz konstrukcja modeli geologicznych wzdłuż profili. Wiarygodna interpretacja geologiczna powierzchniowych danych geofizycznych wymaga odpowiedniej identyfikacji geologicznej wyinterpretowanych granic i kompleksów geofizycznych. Identyfikacji takiej dokonuje się najczęściej poprzez dowiązanie do danych z otworów wiertniczych, rzadziej do wyników interpretacji danych sejsmicznych czy powierzchniowych danych geologicznych. Podstawową rolę spełnia, w tym względzie, omówiona powyżej interpretacja sondowań parametrycznych, wykonanych w pobliżu otworów wiertniczych. W północnej i zachodniej części obszaru badań odwiercone zostały stosunkowo liczne otwory badawcze i poszukiwawcze, co umożliwiło wiarygodną interpretację stropu podłoża podmioceńskiego i prekambryjskiego. W środkowej i południowej części obszaru badań brak otworów wiertniczych sięgających do podłoża uniemożliwia w praktyce wiarygodną jego identyfikację.

Podstawą interpretacji geologicznej były wyniki inwersji 2D z zastosowaniem więzów w postaci danych z otworów wiertniczych. W szczególności modele geoelektryczne 2D wykorzystane zostały do określenia położenia granic pionowych i stromo nachylonych, a więc głównie stref tektonicznych. Położenie granic poziomych lub zbliżonych do poziomych określono uwzględniając wyniki inwersji zarówno 2D, jak i interpretacji 1D. W konstrukcji modeli strukturalnych wzdłuż profili wykorzystano ponadto powierzchniową mapę geologiczną, informacje z otworów wiertniczych i w pewnym stopniu dane sejsmiczne. Wyinterpretowany model geologiczny dla przekroju Przyborów – Zator przedstawiony na tle przekroju geoelektrycznego 2D przedstawia figura 8.



**Fig. 8.** Interpretacja geologiczna danych magnetotellurycznych wzdłuż profilu Przyborów – Zator (nr 3) na tle wyników 2D inwersji metodą NLCG z zastosowaniem więzów geologicznych; A) model w postaci siatki elementów skończonych, B) przekrój interpolowany

**Fig. 8.** Geological interpretation of MT data along profile Przyborów – Zator (No. 3), at the background of results of 2D NLCG inversion made with geological constraints; A) model of finite elements mesh, B) interpolated section

## WYNIKI INTERPRETACJI

Typowy rozkład oporności w przekrojach geoelektrycznych jest dwudzielny. Część górna przekroju, związana z pokrywą fliszową i z utworami mioceńskimi, a w części północnej kompleksu karbońskiego, charakteryzuje się względnie niskimi opornościami oraz znacznym

ich zróżnicowaniem (Stefaniuk *et al.* 1998a, b). Jest to cecha intensywnie zaangażowanych tektonicznie kompleksów fliszowych. Ten skomplikowany i niejednoznaczny rozkład oporności powoduje, że interpretacja struktur zbudowanych z serii stosunkowo cienkich warstw o zróżnicowanych parametrach nie jest oczywista. Ogólnie, utwory niskooporowe dominują w jednostkach śląskiej i podśląskiej, natomiast w obrębie jednostki magurskiej pojawiają się kompleksy wysokooporowe. Lokalnie wysokie oporności skał budujących pokrywę fliszową powodują brak wyraźnego kontrastu oporności pomiędzy nasunięciem karpackim, a jego podłożem (Czerwiński & Stefaniuk 2001).

Utwory podłoża podmiocenińskiego, tj. mezozoicznego i paleozoicznego, charakteryzują się, na ogół, wysokimi opornościami rzędu kilkaset, rzadziej powyżej tysiąca czy poniżej stu ometrów. Z kolei utwory prekambru charakteryzują się jeszcze wyższymi opornościami (kilkaset i często powyżej tysiąca ometrów), chociaż obserwuje się strefy i warstwy o opornościach relatywnie niskich. Strop podłoża podmiocenińskiego tworzy więc często ostrą granicę opornościową (Czerwiński *et al.* 2003).

Jak wspomniano powyżej, w części północnej i zachodniej obszaru, gdzie istnieje stosunkowo duża ilość danych otworowych i sejsmicznych, określenie położenia utworów mezozoiczno-paleozoicznych, a także stropu utworów prekambryjskich jest względnie wiarygodne. W części południowej, w której wgłębne rozpoznanie geologiczne jest słabe, śledzenie zasięgu utworów mezozoiczno-paleozoicznych i ich geologiczna identyfikacja są niejednoznaczne. Stopień dokładności i wiarygodności wyinterpretowanych modeli geologicznych ograniczone są ponadto przez niskie zagęszczenie sondowań magnetotellurycznych na profilach.

### Przekroje geoelektryczno-geologiczne

Dla najbardziej wysuniętego na zachód przekroju **Przyborów – Zator** (nr 3) kontrast opornościowy pomiędzy utworami fliszowymi i osadami miocenu autochtonicznego, a podścielającym je kompleksem podłoża mezozoicznego i paleozoicznego oraz prekambryjskiego jest na ogół wyraźny (Fig. 8; Czerwiński *et al.* 2000, 2003). Wyjątkiem są niskooporowe utwory karbonu podścielające również niskooporowy miocen autochtoniczny na północnym krańcu tego przekroju oraz względnie wysokooporowe utwory miocenu autochtonicznego w pobliżu otworu Lachowice-7 i Lachowice-3a, słabo na ogół kontrastujące z wysokooporowym podłożem i dosyć wysokooporowym kompleksem fliszowym. Utwory karbonu w północnej części przekroju charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem oporności. W środkowej części przekroju utwory miocenu autochtonicznego bezpośrednio zalegają na utworach prekambru, które tworzą strefę wyniesioną (otw. Ślemień-1, Andrychów-6).

Dyskusyjne jest występowanie kompleksów karbonu i dewonu na południowym krańcu przekroju. Charakterystyka opornościowa mięszszego kompleksu płasko zalegającego na względnie wysokooporowych utworach, prawdopodobnie prekambryjskich, wskazuje na możliwość występowania tych formacji, zwłaszcza w obrębie rowu tektonicznego rysującego się pomiędzy sondowaniami PZ 2 i PZ 4. Nie jest jednak wykluczone, że ww. rów wypełniają utwory miocenu, które przykrywają także południowe, wiszące skrzydło tej struktury.

Tektonika podłoża wzdłuż profilu Przyborów – Zator jest wybitnie złożona i miejscami trudna do wyjaśnienia za pomocą modelu 2D. Jest to zapewne rezultatem jego lokalizacji

w obrębie strefy o blokowej tektonice oraz orientacji względem stref tektonicznych (Baran *et al.* 1997). W północnej części przekroju podłoże rozpada się na szereg bloków. Strop podłoża zalega względnie płytko i tworzy szereg zrębów i rowów tektonicznych o charakterze antytetycznym (Fig. 8). Strefa tektoniczna zaznaczająca się w pobliżu sondowań nr 11 i 12 ma prawdopodobnie charakter przesuwczy. Urozmaicenie powierzchni stropowej podłoża związane jest zapewne także z intensywną erozją rozwijającą się w strefach zluźnień tektonicznych.

Jak wspomniano powyżej partie stropowe podłoża budują utwory karbonu o zróżnicowanej oporności. Poniżej zalegają kolejno utwory wysokooporowe dewonu węglanowego (środkowy i górny) i niskooporowego klastycznego dewonu dolnego, a także kompleks kambriu leżący na prekambrze. Interpretowane oporności kolejnych formacji systematycznie rosną wraz z głębokością, chociaż może to być efekt ograniczonej rozdzielczości wyników inwersji 2D. Według danych geofizyki otworowej z otworu Piotrowice-1, np. dewon dolny jest niskooporowy. Utwory prekambriu są wyraźnie wysokooporowe w części północnej przekroju, lecz ich charakter zmienia się radykalnie w części południowej, na S od sondowania PZ 8. Może być to efekt zmian związanych z intensywnym zaangażowaniem tektonicznym podłoża, chociaż raczej zmianę charakteru utworów prekambriu należy wiązać obecnością starego uskoku pojawiającego się pomiędzy sondowaniami nr PZ 8 i PZ 9.

W środkowej części przekroju zaznacza się złożony wewnętrznie zręb tektoniczny. Południowa jego część ma zapewne stare założenia, o czym świadczy obecność prekambriu bezpośrednio pod miocenem w otworze Ślemień-1. Na południe od powyższego zrębu pojawia się antytetyczny rów tektoniczny rozwinięty na zespole uskoku o charakterze, prawdopodobnie, zrzutowo-przesuwczym. Na południowym krańcu przekroju podłoże podnosi się. Wyniesienie to jest jednak uchwycone tylko przez pojedyncze sondowanie (PZ 1).

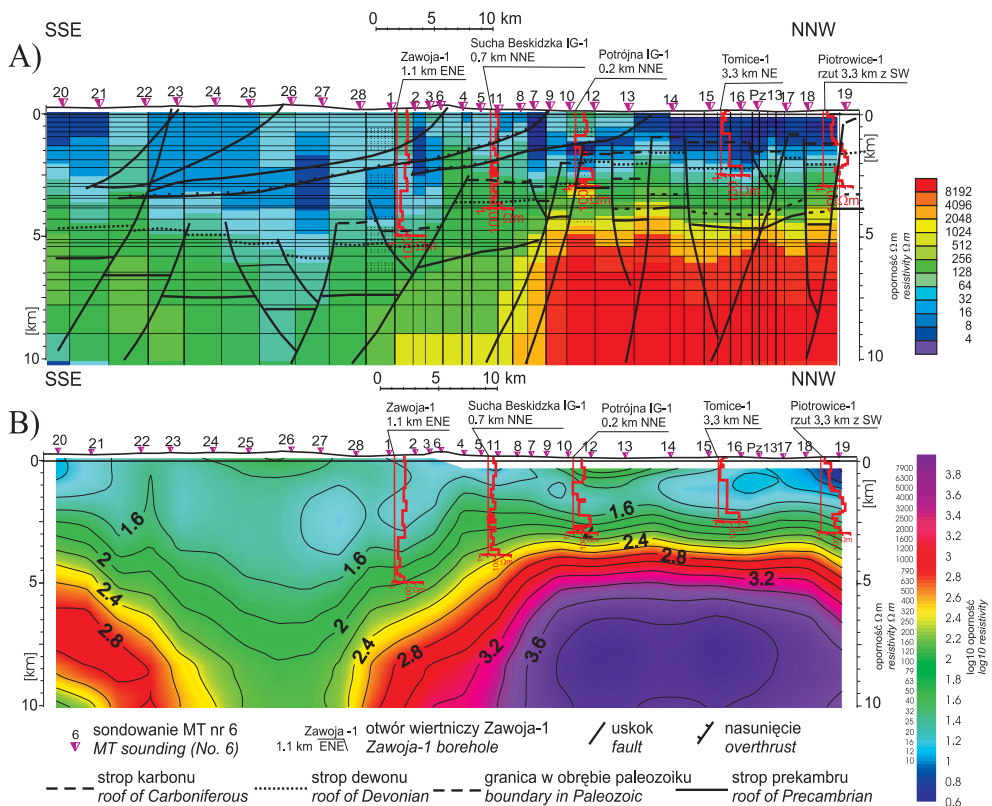
W rozkładzie oporności w pokrywie fliszowej zaznaczają się jednostki tektoniczno-stratygraficzne oraz strefy fałdowe. Brak szczegółowych danych otworowych nie pozwala jednak na bardziej dokładną interpretację struktur nasunięcia karpackiego.

Charakterystyka przekroju geoelektrycznego **Chyżne – Spytkowice** (nr 4) w północnej i środkowej części jest podobna do opisanego powyżej przekroju Przyborów – Zator (nr 3) (Fig. 9). W części południowej rozkład oporności zbliżony jest natomiast do przedstawionego poniżej przekroju Chyżne – Niepołomice (nr 6). Model geologiczny północnego odcinka przekroju jest bardzo zbliżony do modelu wyinterpretowanego dla profilu Przyborów – Zator. Środkowa część przekroju jest natomiast dość dobrze skorelowana z południową częścią przekroju Przyborów – Zator.

Na południe od otworu wiertniczego Potrójna IG 1 zaznacza się strefa tektoniczna radykalnie zmieniająca charakter podłoża prekambryjskiego z wybitnie wysokooporowego (kilka tysięcy  $\Omega\text{m}$ ) w części północnej na podłoże o obniżonej oporności (kilkaset  $\Omega\text{m}$ ) w centralnej i południowej części przekroju. W pobliżu otworu wiertniczego Zawoja 1 rozpoczyna się zestaw uskoku o charakterze zrzutowym lub zrzutowo-przesuwczym, formujący dwa rowy tektoniczne przedzielone strukturą zrębową. Większy z tych rowów, zlokalizowany w strefie sondowań ZP 25 do ZP 28, o szerokości kilkunastu kilometrów i głębokości sięgającej 2 km, wypełniony jest utworami o opornościach rzędu kilku do kilkudziesięciu  $\Omega\text{m}$ . Są to najprawdopodobniej utwory drobnoklastyczne, chociaż nie można wykluczyć zmian oporności skał krystalicznych związanych z głęboko zakorzenioną strefą uskoku.



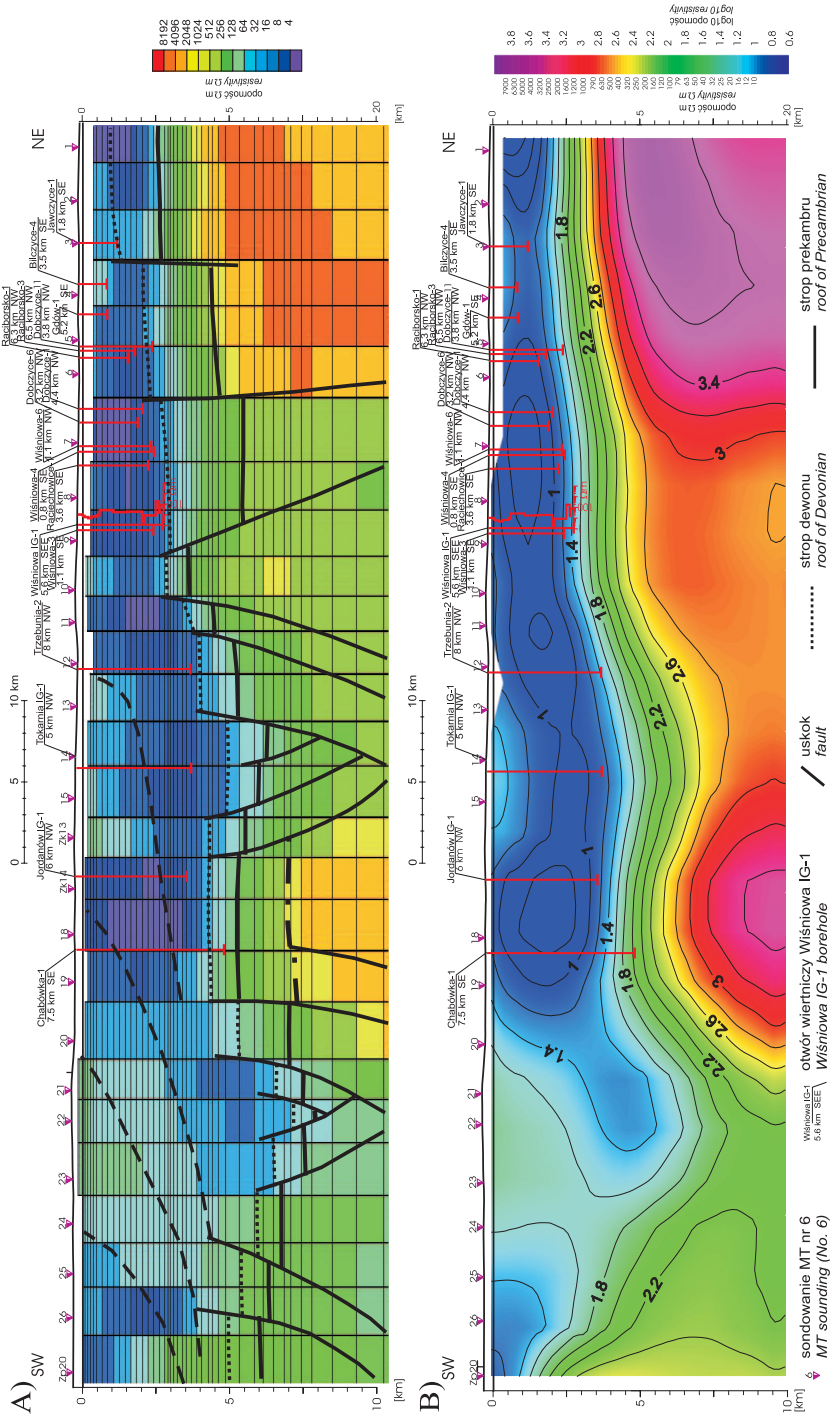
Od południa powyższy rów zamyka strefa podniesiona sąsiadująca bezpośrednio z pieńskim pasem skałkowym. Na południowym krańcu przekroju zaznacza się uskoc odwrócony przecinający prawdopodobnie również pokrywę fliszową.



**Fig. 9.** Interpretacja geologiczna danych magnetotellurycznych wzdłuż profilu Chyżne – Spytkowice (nr 4) na tle wyników 2D inwersji metodą NLGC z zastosowaniem więzów geologicznych; A) model w postaci siatki elementów skończonych, B) przekrój interpolowany

**Fig. 9.** Geological interpretation of MT data along profile Chyżne – Spytkowice (No. 4), at the background of results of 2D NLGC inversion made with geological constraints; A) model of finite elements mesh, B) interpolated section

Zróznicowanie oporności pokrywy fliszowej jest podobne jak dla omawianego powyżej przekroju Przyborów – Zator. Zaskakująco niskie wydają się oporności kompleksów jednostki magurskiej w jej południowej części. Blok o podwyższonej oporności w obrębie utworów fliszowych w rejonie Suchoj Beskidzkiej związany jest, być może, z wpływem zakłóceń wywołanych przez zelektryfikowaną trakcję kolejową. Niska gęstość sondowań wzdłuż profilu i brak szczegółowych danych geologicznych nie pozwala na detaliczną interpretację pokrywy fliszowej. Wyznaczone zostały tylko przybliżone granice jednostek tektoniczno-stratygraficznych zaznaczające się w rozkładzie oporności.



**Fig. 10.** Interpretacja geologiczna danych magnetotelurycznych wzdłuż profilu Chyżne – Niepołomice (nr 6) na tle wyników 2D inwersji metodą NLCG z zastosowaniem więzów geologicznych; A) model w postaci siatki elementów skończonych, B) przekroj interpolowany

**Fig. 10.** Geological interpretation of MT data along profile Chyżne – Niepołomice (No. 6), at the background of results of 2D NLCG inversion made with geological constraints; A) model of finite elements mesh, B) interpolated section

Nietypowa orientacja profilu **Chyżne – Niepołomice** jest konsekwencją próby dostosowania jego przebiegu do profilu głębokich badań sejsmicznych nr 3, wykonanego w ramach projektu CELEBRATION. W jego północnej części, pomiędzy sondowaniami MT nr 1 i 15 utwory fliszu są niskooporowe, o opornościach od kilku do kilkunastu  $\Omega\text{m}$ , rzadziej kilkudziesięciu  $\Omega\text{m}$  (Fig. 10).

Kontrast opornościowy pomiędzy utworami fliszu i miocenu oraz podłożem mezozoiczno-paleozoicznym jest wyraźny, podobnie jak granica pomiędzy podłożem mezozoiczno-paleozoicznym a utworami prekambryjskimi. Miąższość kompleksu mezozoiczno-paleozoicznego dla tego obszaru jest dosyć duża (do 2 km). Wyjątkiem jest strefa zrębowa pomiędzy sondowaniami nr 9 i 10, gdzie prekambr zalega płycej, prawdopodobnie bezpośrednio pod cienką warstwą jury. Podłoże w tym obszarze zapada stopniowo ku SW, od głębokości rzędu kilkuset metrów na północno-wschodnim krańcu przekroju do 5÷6 km w pobliżu sondowania 14. Zaznaczają się tutaj przynajmniej cztery znaczące strefy uskokowe, tworzące ogólnie system schodkowy oraz formujące wspomniany powyżej zrąb tektoniczny. W pobliżu sondowań 14 i 15 pojawia się obniżenie o charakterze rowu tektonicznego. W strefie walnego, prawdopodobnie inwersyjnego uskoku, pojawiającego się pomiędzy sondowaniami 6 i 7, zmienia się wyraźnie charakterystyka opornościowa utworów prekambru. Na NE od tej granicy oporności prekambru sięgają kilka tysięcy omometrów, natomiast na SW obniżają się do kilkuset.

Pomiędzy sondowaniami zk 13 i 21 pojawia się wysoko wyniesiony horyzont o podwyższonej oporności (200÷300  $\Omega\text{m}$ ), poprzecinany szeregiem wyraźnych stref tektonicznych. Wydzielenie kompleksu mezozoiczno-paleozoicznego o oporności prawdopodobnie zbliżonej do utworów fliszowych jest niepewne. Występującą na głębokości ok. 6÷7 km granicę bardzo wysokooporową należy wiązać ze stropem ciała intruzywnego. Oporności głębokiego podłoża rosną tutaj do 2÷3 tysięcy  $\Omega\text{m}$ . Strefa wysokooporowa formuje kopulasty stożek o szerokości rzędu kilkunastu kilometrów. Nie można wykluczyć, że z tą strukturą związane są źródła tzw. jordanowskiej anomalii magnetycznej.

Południowa część omawianego profilu charakteryzuje się zróżnicowaną opornością nadkładu, w obrębie którego występują kompleksy o znacznej oporności. Granica pomiędzy nadkładem a podłożem jest niezbyt wyraźna, a głęboko w podłożu pojawia się miąższa warstwa niskooporowa. Pomiędzy strefami wyniesionymi rejonu Jordanowa i SW krańcem profilu zaznacza się głębokie obniżenie o charakterze rowu tektonicznego wypełnionego utworami o opornościach rzędu kilku – kilkudziesięciu  $\Omega\text{m}$ . Struktury południowej części przekroju Chyżne – Niepołomice (nr 6), dobrze korelują się, z opisanymi powyżej, strukturami pojawiającymi się w południowej części przekroju Chyżne – Spytkowice (nr 4).

## Geologiczna interpretacja przekrojów geoelektrycznych

Na przedstawionych przekrojach widoczne są osady fliszowe Karpat zewnętrznych budujące kompleksy piaskowcowo-mułowcowo-ilaste, które ułożone są płaszczowinowo w szereg indywidualnych jednostek tektonicznych ponasuwanych na siebie w kierunku północnym (Golonka 2007). Utwory te mają charakter allochtoniczny, to znaczy zostały odkłute od swego podłoża i przemieszczone. Wśród kompleksów allochtonicznych wyróżnia się, idąc od południa: jednostkę (płaszczowinę) magurską, grupę płaszczowin przedmagurskich, płaszczowiny śląską, podśląską i skolską.

Utwory wchodzące w skład płaszczowin karpackich charakteryzują się różnymi opornościami. Najwyższe oporności wykazują paleoceńskie piaskowce magurskie należące do płaszczowiny magurskiej oraz górnokredowe piaskowce godulskie należące do płaszczowiny śląskiej. Piaskowce te występują w kompleksach przekraczających 1 km miąższości. Serie płaszczowiny podśląskiej i należące do grupy płaszczowin przedmagurskich zawierają znaczne ilości łupków ilastych i margli, wchodzących w skład drobnorytmicznego fliszu i charakteryzują się niższą opornością. Niższą oporność mogą wykazywać też utwory fliszu dystalnego, takie jak formacja ropianiecka, pstry łupki formacji z Łabowej, czy formacja beloweska płaszczowiny magurskiej, jak również łuki pstry, warstwy hieroglifowe, czy formacja menilitowa płaszczowiny śląskiej. Niektóre kompleksy piaskowcowe płaszczowiny śląskiej, takie jak piaskowce istebniańskie, czy ciężkowickie mogą wykazywać wyższą porowatość i być zawadnione.

Wyżej wymienione cechy płaszczowin fliszowych powodują, że w optymalnych warunkach, jest możliwe ich rozróżnienie na przekrojach geologicznych. Można wyróżnić spąg płaszczowiny podśląskiej będący jednocześnie spągiem całego nasunięcia Karpat zewnętrznych, spąg płaszczowiny śląskiej, spąg grupy płaszczowin przedmagurskich oraz spąg płaszczowiny magurskiej. Płaszczowina skolska występuje we fragmentach i jej rozróżnienie nie jest możliwe. Można natomiast czasami wyróżnić jednostki drugiego rzędu (łuski) w obrębie płaszczowin magurskiej i śląskiej.

Poniżej nasunięcia znajdują się utwory podłoża zbudowane z silnie sfałdowanych prekambryjskich skał metamorficznych należących do teranu Bruno-Vistulicum, z paleozoiczno-mezozoiczną pokrywą platformowa, oraz autochtonicznymi, lub częściowo sfałdowanymi utworami miocenu (Ślaczka 1975, 1976a, 1976b, Moryc 2005, Cieszkowski *et al.* 2006). Utwory podłoża są przecięte szeregiem dyslokacji. Na ogół dyslokacje podłoża i fliszu są od siebie niezależne. Dyslokacje fliszowe w większości powstawały w okresie istnienia przyzmy akrecyjnej, w trakcie formowania się płaszczowin, przed pełnym ich nasunięciem na przedpole. Uskoki w podłożu powstawały natomiast w różnych okresach czasowych. Wyróżnia się:

- dyslokacje przecinające wyłącznie skonsolidowane podłoże i pokrywę paleozoiczną, które powstawały w okresie formowania się podłoża w późnym prekambrze, paleozoiku i mezozoiku;
- dyslokacje przecinające skonsolidowane podłoże, pokrywę paleozoiczno-mezozoiczną oraz utwory neogenu, związane z nasuwaniem się allochtonu, który powodował uginanie się platformy i jej pękanie równoległe do ułożenia płaszczowin a prostopadłe do kierunku nasuwania się;
- dyslokacje przecinające skonsolidowane podłoże, pokrywę paleozoiczno-mezozoiczną, utwory neogenu i wchodzące w utwory alochtoniczne, fliszowe.

Te ostatnie są dyslokacjami najmłodszymi, powstałymi po nasunięciu się płaszczowin fliszowych. Najczęściej są to uskoki przesuwcze o kierunkach zarówno prostopadłych, jak i równoległych do kierunku struktur allochtonicznych. Interpretacja tektoniczna wzdłuż profili magnetotellurycznych jest w generalnych zarysach zgodna z interpretacją przekrojów sejsmicznych (Pietsch *et al.* 2007).

Podłoże prekambryjskie charakteryzuje się wysoką opornością i jest stosunkowo łatwe do odróżnienia. W obrębie podłoża widać różne elementy. Szczególnie dobrze jest to widoczne na profilu Chyżne – Spytkowice, gdzie podłoże wyraźnie zapada ku południowi, a następ-

nie blisko Chyżnego i granicy państwa występuje element wydźwignięty. Element ten może należeć do odkłutego teranu Karpat wewnętrznych. Dyslokacje tworzą w obrębie podłoża szereg rowów i zrębów tektonicznych.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Rezultaty interpretacji danych magnetotellurycznych dostarczają nowych danych, pozwalających na rozpoznanie struktury i zmienności litologicznej głęboko pograżonych fragmentów pokrywy fliszowej, a zwłaszcza jej podłoża. Do najważniejszych wyników badań należy zaliczyć rozpoznanie tektoniki i morfologii stropu podłoża podmioceńskiego. W północnej i zachodniej części obszaru badań wyniki interpretacji są dobrze dowiązane do danych otworowych, wobec czego należy uznać je za wiarygodne. W tej strefie możliwe było rozdzielenie podłoża mezozoiczno-paleozoicznego i prekambryjskiego. W pozostałych częściach obszaru badań, gdzie otwory wiertnicze nie sięgają podłoża nasunięcia karpackiego, ilościowa interpretacja obciążona jest prawdopodobnie większym błędem, a geologiczna identyfikacja wydzielonych kompleksów geoelektrycznych jest niejednoznaczna.

Na uwagę zasługuje zastosowana metodyka prac interpretacyjnych. Oparta została ona w głównej mierze na wynikach inwersji 2D z wykorzystaniem algorytmu NLCG i zastosowaniem więzów zbudowanych na podstawie danych litologiczno-stratygraficznych z otworów wiertniczych i profilowań geofizyki otworowej. Uzupełniającą rolę spełniły wyniki inwersji 1D.

*Prezentowana praca została wykonana w czasie realizacji projektu badawczego nr 4 T12 B 025 28 Ministerstwa Nauki i Informatyzacji pt. „Nowe aspekty interpretacji wyników pomiarów geofizycznych dla weryfikacji możliwości poszukiwania węglowodorów w Karpatach Zachodnich”. W artykule wykorzystane zostały wyniki badań magnetotellurycznych wykonanych w ramach realizacji „Projektu badań magnetotellurycznych w Karpatach”, finansowanego przez Ministerstwo Środowiska poprzez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej oraz Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo S.A. Wykonawcą prac magnetotellurycznych było Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych w Warszawie. Autorzy dziękują kierownictwom tych instytucji za udostępnienie wyników badań. Podziękowania należą się również, Danucie Ilcewicz-Stefaniuk i Markowi Wojdyle za okazaną pomoc.*

## LITERATURA

- Baran U., Jawor E. & Jawor W., 1997. Rozpoznawanie geologiczne i wyniki prac poszukiwawczych za węglowodorami w zachodniej części polskich Karpat. *Przegląd Geologiczny*, 45, 66–75.
- Berdičevski M.N., 1968. *Električeskaja razvedka metodom magnetotelluričeskogo profilirovanija*. Nedra, Moskwa.
- Cieszkowski M., Golonka J., Waškowska-Oliwa A. & Chrustek M., 2006. Budowa geologiczna rejonu Sucha Beskidzka – Świnna Poręba (polskie Karpaty fliszowe). *Kwartalnik AGH Geologia*, 32, 2, 155–201.

- Constable S.C., Parker R.L. & Constable C.G., 1987. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52, 289–300.
- Czerwiński T., Klityński W. & Stefaniuk M., 2000. Some results of magnetotelluric survey in Polish Western Carpathians. PANCARDI 2000, Abstracts. *Vijesti*, 37/3, 31.
- Czerwiński T. & Stefaniuk M., 2001. Recognition of geological structure of the Carpathians as a result of magnetotelluric investigations. *Slovak Geological Magazine*, 7, 2, 139–144.
- Czerwiński T., Klityński W., Florek R. & Stefaniuk M., 2003. Regionalne badania magnetotelluryczne w polskich Karpatach Zachodnich. *Kwartalnik AGH Geologia*, 3–4, 169–196.
- de Groot-Hedlin C. & Constable S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613–1624.
- Gamble T.D., Goubau W.M. & Clarke J., 1978. Magnetotellurics with remote magnetic reference. *Geophysics*, 44, 53–68.
- Golonka J., 2007. Tektonika polskich Karpat fliszowych pomiędzy Bielskiem-Białą a Nowym Targiem. *Kwartalnik AGH Geologia*, 33, 4/1, 29–38.
- Jones A.G., 1988. Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment. *Geophysics*, 53, 7, 967–978.
- Klityński W. & Stefaniuk M., 2000. Wyniki interpretacji sondowań magnetotellurycznych w Karpatach Zachodnich. Mat. Semin.: Wysokoczęstotliwościowe badania magnetotelluryczne w Polsce, Kraków, 30–32.
- Larsen J.C., Mackie R.L., Manzella A., Fiordelisi A. & Rieven S., 1996. Robust smooth magnetotelluric transfer functions. *Geophysical Journal International*, 124, 801–819.
- Miecznik J., Stefaniuk M. & Klityński W., 1995. The methodology of magnetotelluric investigation in heterogeneous media. *Bulletin of Polish Academy of Sciences, Earth*, 43, 99–112.
- Moryc W., 2005. Rozwój utworów miocenu w Karpatach Zachodnich na obszarze Bielsko-Kraków. *Kwartalnik AGH Geologia*, 31, 1, 5–73.
- MT-1 Magnetotelluric System Operation Manual, version 3.2, 1996. EMI Inc., Richmond, Ca., USA, 1–235.
- Pepel A., Miecznik J., Stefaniuk M., Jamrozik A., Żytko K., Jawor E. *et al.*, 1997. Projekt badań magnetotellurycznych w Karpatach. *Archiwum PBG Warszawa*, 1–69.
- Pietsch K., Golonka J. & Marzec P., 2007. Stosunek podłoża do fliszu Karpat Zewnętrznych pomiędzy Wadowicami a Babią Górą w świetle refleksyjnych badań sejsmicznych. *Kwartalnik AGH Geologia*, 33, 4/1, 197–210.
- Rodi W. & Mackie R.L., 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66, 1, 174–187.
- Shalivahan & Bhattacharya B.B., 2002. How remote can the far remote reference site for magnetotelluric measurements be? *Journal of Geophysical Research*, 107, B6, ETG 1–1 – 1–8.
- Stefaniuk M., 2000. Metodyczne implikacje zastosowania nowoczesnego, wysokoczęstotliwościowego systemu magnetotellurycznego MT-1 w Karpatach. Mat. Semin.: Wysokoczęstotliwościowe badania magnetotelluryczne w Polsce, Kraków, 11–17.
- Stefaniuk M., 2003. Regionalne badania magnetotelluryczne w polskich Karpatach wschodnich. *Kwartalnik AGH Geologia*, 26, 3–4, 131–168.

- Stefaniuk M., Miecznik J., Pepel A., Farbisz J., Pałysa E., Ostrowski C., Mucha K., Wajda A. & Fibiger J., 1997. Instrukcja metodyczna realizacji badań magnetotellurycznych. *Archiwum PBG Warszawa*, 1–102.
- Stefaniuk M., Czerwiński T., Wajda A. & Mrzygłód T., 1998a. Perspektywy i problemy wykorzystania badań magnetotellurycznych do rozpoznawania utworów fliszowych na przykładzie przekroju Zawoja – Potrójna. XIX Konferencja Terenowej Sekcji Tektonicznej Polskiego Towarzystwa Geologicznego – Magura '98, Materiały Konferencyjne, 42–43.
- Stefaniuk M., Miecznik J., Pepel A., Klityński W., Mrzygłód T., Wajda A. & Palka-Zielińska E., 1998b. Dokumentacja badań magnetotellurycznych i kompleksowe opracowanie danych geofizycznych i geologicznych wzdłuż profili Zawoja – Potrójna i Kamienica Dolna – Łopuchowa 1997-1998. *Archiwum PBG Warszawa*, 1–78.
- Stefaniuk M., Adamczak T., Klityński W., Miecznik J., Pepel A., Żytko K. i inni, 1999. Dokumentacja badań magnetotellurycznych w Karpatach – obszar zachodni, część I. CAG Warszawa, *Archiwum PGNiG S.A. OGN Warszawa*, 1–104.
- Stefaniuk M., Adamczak T., Florek R., Klityński W., Mrzygłód T., Pepel A., Ślączka A. i inni, 2001. Dokumentacja badań magnetotellurycznych w Karpatach – obszar zachodni, część II. CAG Warszawa, *Archiwum PGNiG S.A. OGN Warszawa*, 1–110.
- Stefaniuk M., Florek R. & Klityński W., 2003. Structure of the Carpathian basement in the vicinity of the Pieniny Klippen Belt in Poland as a result of magnetotelluric survey. *Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences*, M-28 (363), 171–172.
- Stefaniuk M., Wojdyła M., Klityński W., Joniec A. & Borowiec M., 2007. Zastosowanie metody ciągłych profilowań magnetotellurycznych do rozpoznawania budowy geologicznej pokrywy fliszowej w Karpatach. Projekt badawczy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, nr 5 t12b 041 25. Sprawozdanie końcowe.
- Sternberg B.K., Washburne J.C. & Pellerin L., 1988. Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings. *Geophysics*, 53, 1559–1568.
- Ślączka A., 1975. Wyniki geologiczne otworu Potrójna IG1. *Kwartalnik Geologiczny*, 19, 2, 487–488.
- Ślączka A., 1976a. Profil geologiczny otworu wiertniczego Sucha IG1. *Kwartalnik Geologiczny*, 20, 4, 958–959.
- Ślączka A., 1976b. New data on the structure of the basement of the Carpathians south of the Wadowice. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 46, 337–350.
- Zacharski J., Nowak J. & Skucińska M., 2006. Prace interpretacyjne w wybranych otworach w rejonie Karpat Zachodnich. Zlec. WGGiOŚ/zgf/158/2006, Zakład Geofizyki WGGiOŚ AGH.

## Summary

The subject of the paper includes results of reinterpretation of three regional magnetotelluric profiles located in the western part of the Polish Carpathians. Magnetotelluric survey in the area was made by the Geophysical Exploration Company, Warsaw, in the years 1997–2002. Magnetotelluric soundings were conducted at six lines perpendicular to the major orogen axis and two lines parallel to it (Fig. 1). The measurements were made with the MT-1 system over a frequency range  $300 \div 0.0005$  Hz. Reinterpretation works were preceded by analysis of mea-

surement data and reprocessing for some soundings. The remote magnetic reference was applied to eliminate the influence of electromagnetic noise. Field data were processed using the computer program incorporated in the MT-1 system. The results of data processing were amplitude and phase MT sounding curves, impedance polar diagrams and other magnetotelluric parameters, which were then subjected to qualitative and quantitative interpretation.

Automatic 2D inversion and 1D inversion with the use of Occam and LSQ algorithms were employed in reinterpretation process (Figs 2, 3, 4). Geological interpretation was based on results of parametric soundings made close to boreholes (Figs 5, 6). Results of average log parameters measured in L7 borehole are presented in Table 1. The sounding data allowed results of MT data inversion to be compared with resistivity distribution (Fig. 6) interpreted from resistivity logs (Fig. 7) as well as the lithology and stratigraphy of distinguished geological layers to be identified.

2D resistivity sections obtained based on results of automatic 2D and 1D data interpretation were used to construct geoelectric and geologic models. Geological and borehole data, and reflection seismic data were also applied in geological interpretation. Resistivity sections including elements of geological interpretation were the main results of soundings reinterpretation (Figs 8, 9, 10).

The main objective of regional magnetotelluric data interpretation in recognition of the western part of the Polish Carpathian was to determine the morphology of a high-resistivity horizon related with the Carpathian basement. The flysch Carpathians are usually characterized by low resistivities with varied values. Rocks of Meso-Paleozoic and Precambrian age are usually more uniform and are characterized by high resistivities. The high-resistivity horizons are connected with the top of Mesozoic, Paleozoic and Precambrian structures. It can be said that a mosaic of low-, medium-, and high-resistivity blocks is observed there. The geological identification of the blocks is not clear. In the western part (lines 3 and 4), only the roof of the Devonian is visible. The location of the roof of the Carboniferous is not clear.

It can be concluded that magnetotelluric interpretation allowed the elevations and depressions of the high-resistivity basement to be identified. Due to small resistivity contrast and lack of deep borehole data, it is impossible to determine high-resistivity horizons in the southern part of the study area, especially in the case of the Meso-Paleozoic basement.