

WYBRANE ASPEKTY PRZETWARZANIA DANYCH MAGNETOTELLURYCZNYCH Z OBSZARU KARPAT

Selected aspects of magnetotelluric data processing
from the Carpathians

Michał STEFANIUK^{1,2}, Marek WOJDYŁA² & Tomasz DANEK¹

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: stefan@geolog.geol.agh.edu.pl

² Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych; ul. Jagiellońska 76, 03-301 Warszawa;
e-mail: m_wojdyła@pbg.com.pl, danek9@geol.agh.edu.pl

Treść: W pracy przedstawiono przegląd podstawowych problemów związanych z przetwarzaniem danych magnetotellurycznych zarejestrowanych na obszarach o wysokim stopniu zakłóceń elektromagnetycznych. Przeanalizowano źródła zakłóceń i dokonano przeglądu aktualnie stosowanych metod ich eliminacji. Głównym problemem w obszarze karpaccim jest identyfikacja zakłóceń związanych z siecią zelektryfikowanych linii kolejowych oraz ich wpływ na interpretację krzywych sondowań. Przedstawiono założenia metody referencyjnej oraz zanalizowano wyniki testów pomiarowych mających na celu określenie optymalnej odległości, jaka powinna być zachowana pomiędzy punktem polowym i punktem referencyjnym. Przedstawiono także wpływ zastosowania filtrów numerycznych Savitzky'ego–Golaya oraz procedury *Singular Spectrum Analysis* (SSA) na kształt przebiegów czasowych składowych elektrycznych i magnetycznych, oraz na wynik ich przetwarzania.

Słowa kluczowe: magnetotelluryka, przetwarzanie danych, zakłócenia elektromagnetyczne, metoda referencyjna, filtracja numeryczna

Abstract: The paper presents a review of fundamental problems of processing of magnetotelluric data acquired from regions with high electromagnetic noise. The noise sources are discussed and recently applied methods of noise elimination are reviewed. Identification of noise generated by electric railways and its effects on magnetotelluric sounding data interpretation are main problems of MT data interpretation in the Carpathians. The principles of the remote reference method are given. Results of test measurements, which were made to find an optimum distance between a field site and a reference site were analyzed. Effects of application of the Savitzky–Golay numerical filters and the Singular Spectrum Analysis (SSA) on the shape of time series of electric and magnetic components and results of their processing are discussed.

Key words: magnetotellurics, data processing, electromagnetic noise, reference method, numerical filtration

WSTĘP

W ciągu ostatnich kilkunastu lat metoda magnetotelluryczna (MT) przeżywa okres szybkiego rozwoju, dzięki któremu stała się jedną z najważniejszych metod geofizycznych badań powierzchniowych. Pojawiło się kilka wariantów tej metody, a właściwie odrębnych metod, których wspólnym mianownikiem jest wykorzystanie matematycznego opisu propagacji płaskiej fali elektromagnetycznej padającej prostopadle do powierzchni Ziemi. Do zalet tej metody należy zaliczyć względną prostotę rozwiązań matematycznych oraz dostępność i energię źródła pierwotnego pola elektromagnetycznego. W większości wariantów metodycznych wykorzystywane są wariacje naturalnego, ziemskiego pola elektromagnetycznego generowane przez rezonansowe drgania jonosfery pod wpływem zmiennego w czasie natężenia wiatru słonecznego lub też poprzez odległe wyładowania atmosferyczne. Duża energia pola pierwotnego oraz szeroki zakres jego częstotliwości dają unikalną możliwość rozpoznania rozkładu oporności w ośrodku geologicznym dla głębokości od kilkunastu metrów aż do 100 kilometrów i głębiej. Motorem rozwoju tej metody jest wykorzystanie nowych rozwiązań w technice pomiarowej i postęp w aplikacji metod numerycznych.

Obecnie metoda MT wykorzystywana jest zarówno do rozwiązywania szczegółowych problemów w interwale głębokości typowym dla poszukiwań węglowodorów (Stefaniuk *et al.* 2003), jak i do rozwiązywania problemów regionalnych oraz głębokich badań litosferycznych (Stefaniuk 2003, Stefaniuk *et al.* 2006). Chociaż mniej rozdzielcza niż sejsmika, magnetotelluryka pozwala na akwizycję danych w terenach trudno dostępnych, przy zdecydowanie mniejszych od sejsmiki kosztach wykonania zdjęcia. Do takich obszarów w Polsce należą Karpaty, które ciągle uważane są za perspektywiczne pod względem poszukiwań naftowych, jednak akwizycja i interpretacja danych geofizycznych, szczególnie dotyczących kompleksów podfliszowych, jest niemałym wyzwaniem dla kolejnych pokoleń geologów i geofizyków. Wadą metody MT jest jej duża podatność na zakłócenia elektromagnetyczne, które towarzyszą terenom zurbanizowanym. Mierzone na powierzchni ziemi wariacje składowych pola elektromagnetycznego charakteryzują się na ogół niskimi amplitudami. Sygnały zakłócające pochodzące od lokalnych emiterów często znacznie przewyższają amplitudę pola naturalnego. Postępująca urbanizacja powoduje systematyczne zmniejszanie się obszarów pozbawionych zakłóceń elektromagnetycznych. Jest to trend globalny, który szczególnie wyraźnie zaznacza się w krajach wysoko rozwiniętych i rozwijających się, takich jak kraje europejskie, Stany Zjednoczone czy Chiny.

W tej sytuacji warunkiem dalszego rozwoju metody MT i jej powszechnego stosowania jest opracowanie sposobów identyfikacji przebiegów czasowych naturalnego pola elektromagnetycznego oraz ich wydzielenie z często intensywnych zakłóceń tła. Jest to istotny problem, gdyż w obliczeniach parametrów magnetotellurycznych, będących przedmiotem interpretacji geofizycznej i geologicznej, wykorzystuje się tzw. dynamiczne cechy zapisu przebiegów czasowych, np. amplitudę wariacji, ich okres oraz przesunięcie fazowe pomiędzy odpowiednimi składowymi pola elektromagnetycznego. Natomiast często stosowane sposoby filtracji na ogół powodują zniekształcenia cech dynamicznych, a więc wpływają tym samym na wartość obliczonych parametrów. Dlatego istotne wydaje się tworzenie nowych procedur przetwarzania danych, pozwalających zarówno na wykonywanie wiarygodnych pomiarów, jak i reinterpretację danych archiwalnych.

ŹRÓDŁA SYGNAŁÓW ZAKŁÓCAJĄCYCH W METODZIE MAGNETOTELLURYCZNEJ

Źródłami zakłóceń elektromagnetycznych w metodzie magnetotellurycznej są szумы wewnętrzne urządzeń elektronicznych, różnorodne pola elektromagnetyczne pochodzenia sztucznego i pola naturalne o niepłaskiej charakterystyce przestrzenno-czasowej, czyli nie spełniające podstawowego założenia przyjmowanego w metodzie magnetotellurycznej (Nichols *et al.* 1988). Źródła zewnętrznych zakłóceń sztucznych związane są, przede wszystkim, ze zelektryfikowanymi liniami kolejowymi, liniami przesyłowymi wysokiego napięcia oraz, lokalnie, z domowymi i przemysłowymi odbiornikami energii elektrycznej. Szczególnie niebezpieczne są tutaj pola generowane przez zelektryfikowane linie kolejowe, ze względu na dużą moc i daleki zasięg (nawet do kilkudziesięciu kilometrów), utrudniające zastosowanie procedur eliminacji zakłóceń (Fig. 1).



Fig. 1. Lokalizacja badań magnetotellurycznych i zelektryfikowanych linii kolejowych na tle uproszczonej budowy geologicznej Karpat

Fig. 1. Location of magnetotelluric survey and electric railway lines at the background of simplified geological map of the Carpathians

Sygnal zakłócający propagujący na znaczne odległości podlega modyfikacji i staje się w zasadzie nieodróżnialny od naturalnych wariacji pola elektromagnetycznego. Na ogół wpływ takich odległych źródeł powoduje nieproporcjonalne wzmocnienie pola elektrycznego, a zatem amplitudy składowych tensora impedancji. Wpływ ten szczególnie silnie zaznacza się dla bardzo niskich częstotliwości (Fig. 2). Dobrym przykładem wpływu zakłóceń elektromagnetycznych generowanych w znacznym stopniu przez zelektryfikowaną linię kolejową Rzeszów – Przemyśl są krzywe sondowania wykonanego w pobliżu otworu wiertniczego Bucznik-1, znajdującego na SE od Rzeszowa.

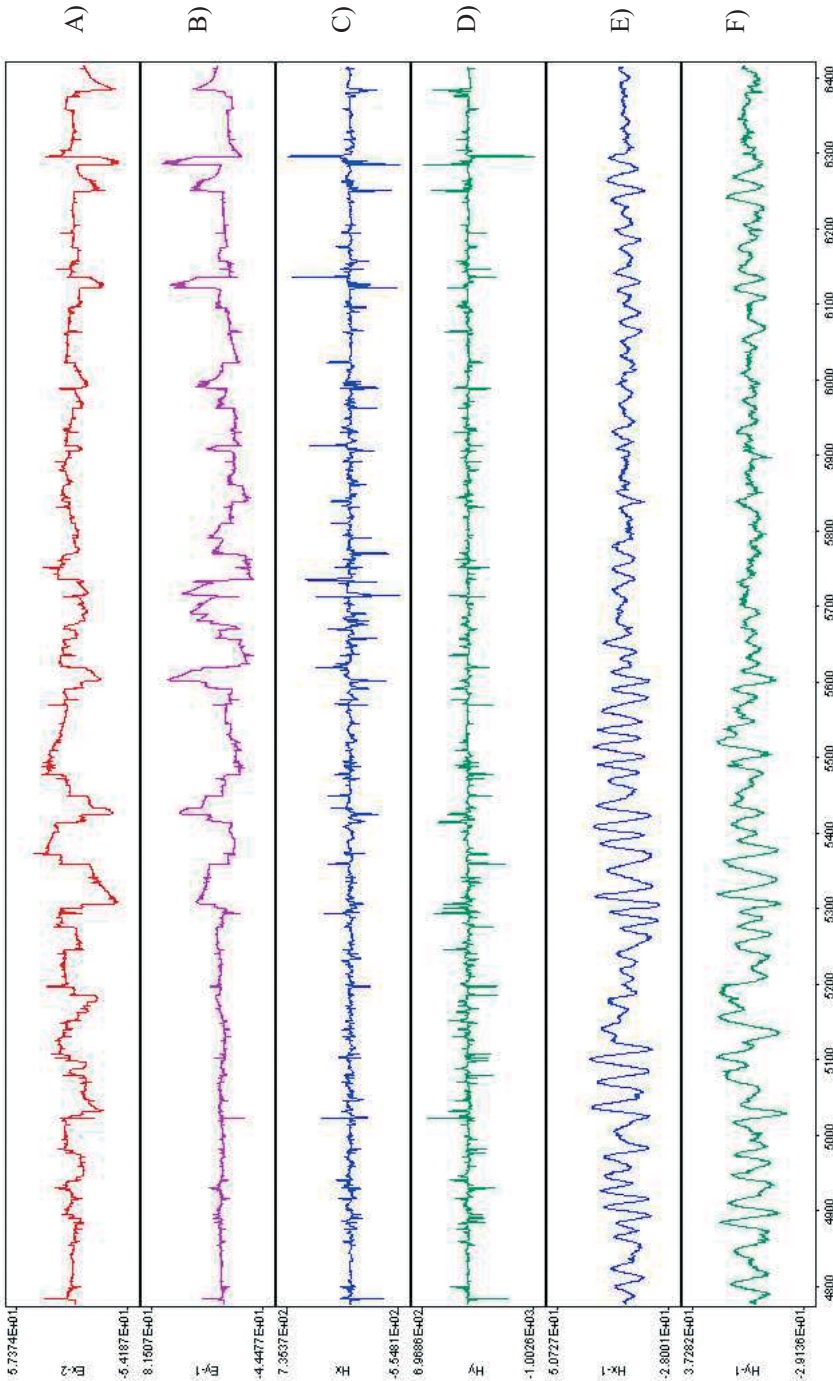


Fig. 2. Przebiegi czasowe składowych elektrycznych E_x (A), E_y (B), H_x (C) H_y (D) zarejestrowane na punkcie pomiarowym znajdującym się około 5 km od zelektryfikowanej linii kolejowej oraz przebiegi czasowe zarejestrowane synchronicznie na punkcie referencyjnym H_x (E) i H_y (F)

Fig. 2. Time series of electric components E_x (A), E_y (B), H_x (C), and H_y (D) recorded at the measurement site some 5 km distant from electric railway line. Time series for H_x (E) and H_y (F) recorded synchronously at the remote reference site

Krzywa pomiarowa obliczona z przebiegów czasowych pola elektromagnetycznego będzie zdecydowanie powyżej krzywej obliczonej dla modelu geoelektrycznego, przedstawionego na figurze 3, skonstruowanego na podstawie analizy profilowań geofizyki wiertniczej.

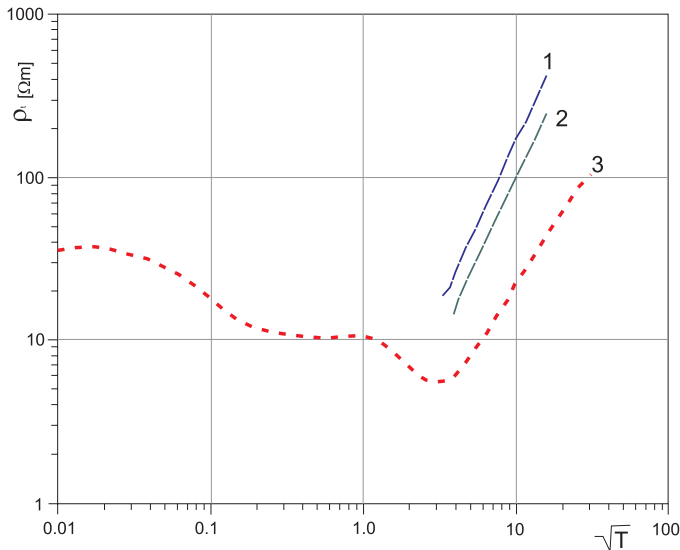


Fig. 3. Krzywe pomiarowe i modelowe obliczone dla 1D rozkładu oporności przy otworze Bucznik-1 (1 – krzywa amplitudowa XY, 2 – krzywa amplitudowa YX, 3 – krzywa modelowa 1D)

Fig. 3. Field curves and model curves calculated for 1D resistivity distribution for the Bucznik-1 well (1 – amplitude curve XY, 2 – amplitude curve YX, 3 – 1D model curve)

Istnieje przypuszczenie, że zakłócenia generowane przez zelektryfikowaną linię kolejową Kraków – Przemysł są odpowiedzialne za szczególnie wysokie oporności rejestrowane poprzez niskoczęstotliwościowe asymptoty archiwalnych sondowań magnetotellurycznych wykonanych za pomocą technik, w których nie wykorzystuje się rejestracji i przetwarzania referencyjnego. Rezultatem powyższych wpływów jest utrata rozdzielności krzywych sondowań oraz interpretacja jednolicie wysokooporowego bloku w podłożu nasunięcia karpackiego (Stefaniuk 2003).

Lokalne źródła zakłóceń związane są głównie z domowymi odbiornikami energii elektrycznej oraz instalacjami przesyłowymi i mają charakterystykę relatywnie wysoko częstotliwościową. Ich oddziaływanie jest krótkodystansowe i stosunkowo łatwo jest uniknąć ich wpływu poprzez odpowiedni wybór miejsca pomiaru. Naturalne źródła zakłóceń to przede wszystkim bliskie wyładowania atmosferyczne, chociaż może incydentalnie pojawić się naturalne pole elektromagnetyczne generowane w ośrodku skalnym. Innym rodzajem zakłóceń zewnętrznych są indukowane impulsy elektromagnetyczne wywołane przez mechaniczne drgania urządzeń pomiarowych (efekt mikrofonowy). Szczególnie wrażliwe są na tego typu oddziaływania indukcyjne czujniki magnetyczne. Drgania mechaniczne gruntu wywołane są przez wiatr, szczególnie w pobliżu korzeni drzew, przejazd samochodu, a nawet przejście człowieka lub przebiegnięcie zwierzęcia.

Wpływ szumów wewnętrznych aparatury próbuje się eliminować na drodze konstrukcyjnej, poprawiając stosunek sygnału zewnętrznego do poziomu tzw. białego szumu. Problemem pozostaje jednak ciągle wybitnie zmienny charakter poziomu sygnału użytecznego, a tym samym problem oceny, które partie zarejestrowanych przebiegów czasowych zdominowane są przez wewnętrzne szumy aparaturowe. Takiej oceny dokonuje się na etapie selekcji danych pomiarowych poprzez analizę międzykanałowych koherencji przebiegów czasowych. Brak koherencji pomiędzy kanałami równoległymi elektrycznymi lub magnetycznymi (np. E_{x1} , E_{x2} , H_{x1} , H_{x2}) oraz prostopadłymi kanałami elektrycznymi, magnetycznym (np. E_x i H_y , E_y i H_x) wskazuje na niski poziom sygnału użytecznego. Takie partie danych pomiarowych powinny być eliminowane z dalszego przetwarzania. Nie zawsze jednak metody takie są wystarczająco skuteczne.

PROBLEM „MARTWEGO PASMA”

W zakresie częstotliwości 0.5–10 Hz charakterystyka amplitudowa naturalnych wariacji ziemskiego pola elektromagnetycznego wykazuje rozległe minimum (Fig. 4). W tym też zakresie zarejestrowanie dobrych danych pomiarowych jest na ogół dosyć trudne. Ze względu na brak naturalnych wariacji oraz ich małą energię w literaturze światowej nazywa się ten zakres „martwym pasmem” (*dead band*, Morrison 1997, Santarato & Iliceto 1997).

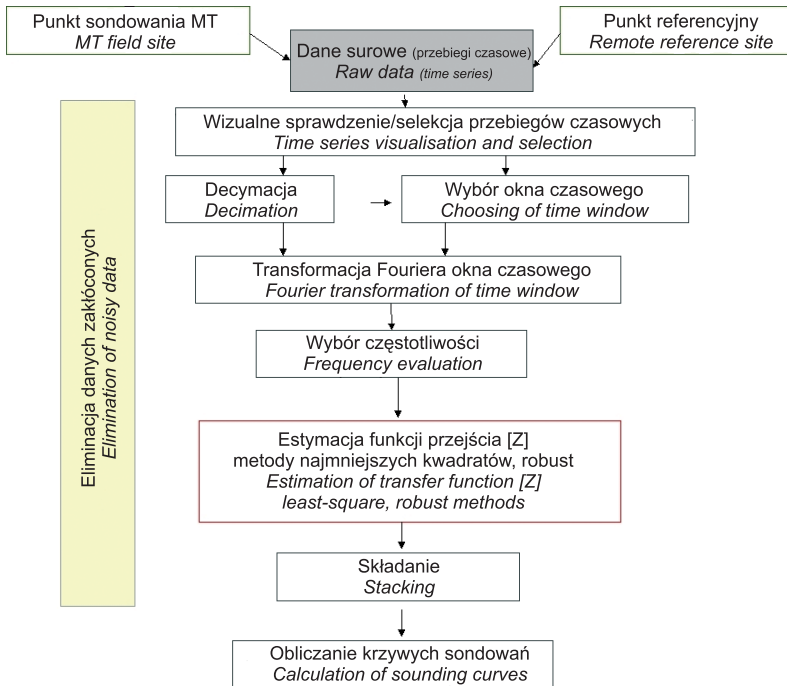


Fig. 4. Schemat przetwarzania danych w metodzie magnetotellurycznej

Fig. 4. Scheme of data processing in the magnetotelluric method

Zagadnienie eliminacji wpływu zakłóceń w martwym paśmie ma szczególnie istotne znaczenie, ponieważ odpowiadające temu pasmu fragmenty krzywych sondowań odnoszą się najczęściej do interpretowanej głębokości 3–5 km, na której w części interesującej geologów naftowych w Karpatach znajduje się główny horyzont wysokooporowy (utożsamiany też z potencjalnymi skałami zbiornikowymi – wapieniami jurajskimi i dewońskimi).

Wobec intensywnych zakłóceń o złożonej charakterystyce przestrzennej, referencyjne przetwarzanie danych często okazuje się w tym przypadku nieskuteczne. Aktualnie nie opracowano jeszcze skutecznego sposobu rozwiązania tego problemu, słusznym podejściem może być natomiast wykorzystanie przetwarzania danych typu „robust” oraz wykorzystanie metody SSA (*Singular Spectrum Analysis*, Danek *et al.* 2006).

PRZEGLĄD AKTUALNYCH ROZWIĄZAŃ WYKORZYSTYWANYCH W PRZETWARZANIU DANYCH MT

Przetwarzanie danych magnetotellurycznych i ich interpretacja bazują na związkach składowych elektrycznych E i magnetycznych H pola elektromagnetycznego na powierzchni ziemi które mogą być przedstawione w postaci równania macierzowego zawierającego tensor impedancji charakteryzujący parametry ośrodka geoelektrycznego (Berdičevski 1968)

$$\begin{vmatrix} E_x \\ E_y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} H_x \\ H_y \end{vmatrix}.$$

Aby otrzymać wartości impedancji Z , dokonuje się rejestracji zmiennych w czasie składowych elektrycznych E i magnetycznych H pola elektromagnetycznego (w postaci przebiegów czasowych). Następnie, wykorzystując szereg procedur zwanych dalej przetwarzaniem danych, oblicza się krzywe amplitudowe i fazowe w funkcji częstotliwości. Wykorzystujemy do tego następujące formuły (Simpson & Bahr 2005):

$$\rho = \frac{0.2}{f} |Z_{ij}|^2 \quad \text{i} \quad \phi_{Z_{ij}} = \tan^{-1} \frac{\text{img}(Z_{ij})}{\text{real}(Z_{ij})}.$$

gdzie $ij = YX, XY$ (polaryzacja pola lub orientacja układu pomiarowego).

Interpretacja krzywych poprzez modelowanie i inwersję (1D, 2D, 3D) pozwala na określenie rozkładu oporności w ośrodku skalnym w funkcji głębokości.

Przetwarzanie przebiegów czasowych pola magnetotellurycznego wykonywane jest dwuetapowo (Fig. 5). Etap pierwszy to głównie wizualna identyfikacja zakłóceń oparta na przeglądaniu kolejnych fragmentów danych osobno w domenie czasu i/lub częstotliwości, oraz z wykorzystaniem spektrogramów (analiza czasowo-częstotliwościowa). Na tym etapie można eliminować kolejne, zakłócone okna czasowe lub stosować filtrację częstotliwościową. Dodatkowo nieprzetworzone przebiegi czasowe poddawane są decymacji. Decymacja to proces uzyskiwania przebiegów czasowych o niższych częstotliwościach próbkowania z przebiegów zarejestrowanych dla częstotliwości wyższych. Pozwala to na wykonywanie szybkiej transformaty Fouriera na oknach czasowych o tej samej długości (np. 512),

przy rejestracji polowej dla jednej częstotliwości próbkowania. Decymacja w znaczący sposób redukuje czas pomiarów niskoczęstotliwościowych. Po decymacji procedura eliminacji zakłóconych okien czasowych musi zostać oczywiście powtórzona. Krzywe amplitudowe i fazowe obliczone z tak wyestymowanej impedancji poddawane są w kolejnych etapach dalszej edycji i analizie, która wchodzi już w zakres interpretacji danych MT. Etap drugi obejmuje procedury estymacji impedancji Z , a następnie obliczenie krzywych sondowań.

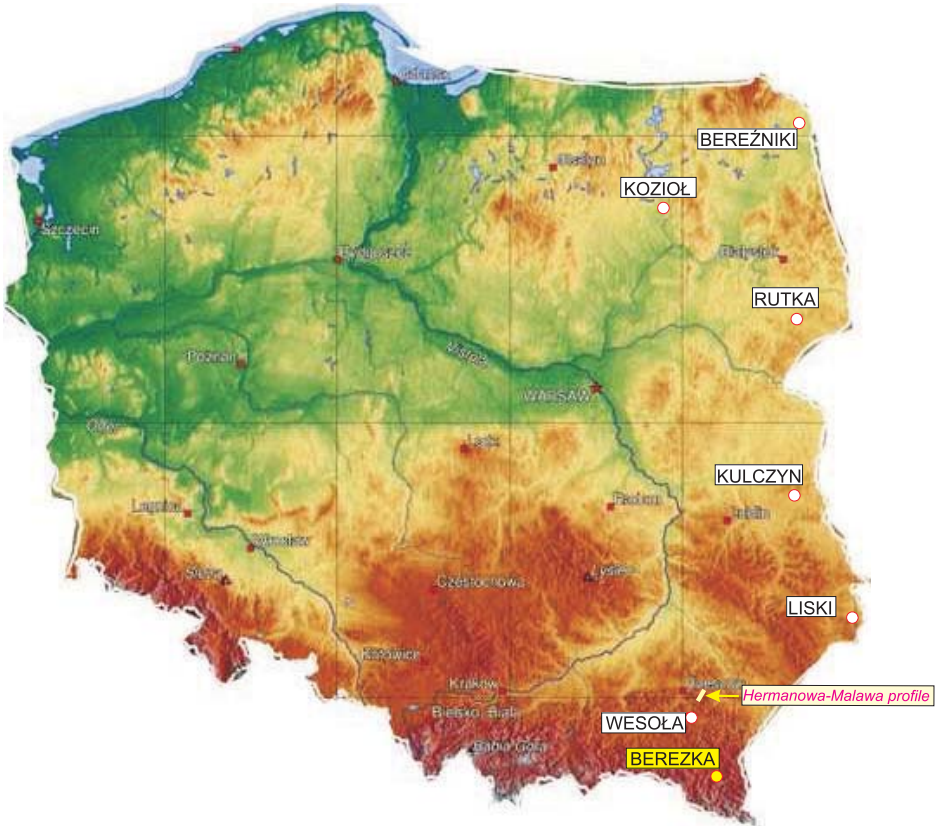


Fig. 5. Lokalizacja profilowań i sondowań magnetotellurycznych wykonanych w ramach pomiarów testowych dla oceny wpływu lokalizacji punktu referencyjnego na wynik przetwarzania danych (mapa Polski wg http://en.wikipedia.org/wiki/Geography_of_Poland)

Fig. 5. Location of MT sounding and MT profiling sites during test measurements, which were made to evaluate effects of remote reference site location on data processing results (map of Poland acc. to http://en.wikipedia.org/wiki/Geography_of_Poland)

Sama estymacja składowych tensora impedancji opiera się na metodzie najmniejszych kwadratów (Wielądek & Ernst 1977, Ernst 1981, Semenov 1985, Ernst *et al.* 2001), przy założeniu, że szum, którym obarczone są rejestracje, ma rozkład Gaussa. Założenie to (szczególnie w odniesieniu do danych obarczonych licznymi zakłóceniami i lukami) nie zawsze

jest słuszne, dlatego w latach 70. i 80. ubiegłego wieku pojawiły się inne rozwiązania, tzw. pomiar i processing referencyjny oraz processing typu „robust” (Gamble *et al.* 1979, Egbert & Booker 1986). W standardzie przemysłowym processing typu „robust” zastosowano około 15 lat później. Jest to statystyczna, iteracyjna metoda przetwarzania danych identyfikująca i eliminująca dane związane z zakłóceniami, których rozkład odbiega od rozkładu normalnego i których niewielka ilość może znacząco obciążyć estymowany parametr (impedancję). Processing typu „robust” może pomóc w rozróżnieniu rzadko występujących, ale silnych niejednorodności pola źródłowego o krótkiej skali przestrzennej. Metody typu „robust”, stosowane równocześnie z metodą referencyjną są aktualnie integralną częścią przetwarzania danych MT, ponieważ okazało się, że w wielu wypadkach dają bardziej wiarygodne estymaty funkcji przejścia Z niż sposoby oparte na metodzie najmniejszych kwadratów. Processing referencyjny typu „robust” może więc w znaczący sposób poprawić jakość danych, pod warunkiem że dysponujemy przynajmniej jednym, synchronicznie rejestrowanym z punktem polowym stanowiskiem pomiarowym określanym jako punkt referencyjny. Gdy takie założenie nie jest spełnione, stosuje się alternatywne metody usuwania szumu. Jedną z nich jest separacja sygnału (Oettinger *et al.* 2001, Palshin & Smirnov 2005). Inne podejście, oparte na edycji danych w domenie częstotliwości i następnie wykorzystaniu processingu typu „robust” dla pojedynczego punktu, zastosowali Weckmann *et al.* (2005).

METODA REFERENCYJNA

Standardowym podejściem w rejestracji i przetwarzaniu danych MT jest stosowanie tzw. punktu referencyjnego (*remote reference*, Gamble *et al.* 1979). Pod tą nazwą kryje się metoda pomiarów i przetwarzania danych polegająca na synchronicznej rejestracji składowych pola na dwóch oddalonych od siebie punktach, a następnie przetwarzaniu przebiegów czasowych w oparciu o założenie, że szum losowy na tych punktach jest nieskorelowany. Znane są też próby estymacji tensora impedancji z zastosowaniem kilku, synchronicznie rejestrowanych punktów referencyjnych (Varentsov & Sokolova 2004). Za pomocą metody referencyjnej nie można usunąć szumu skorelowanego, jaki występuje zarówno w punkcie lokalnym, jak i dalekim. Dlatego osobnym problemem jest lokalizacja punktu referencyjnego, tzn. jego odległość od punktu pomiarowego, oraz obecność i charakter zakłóceń elektromagnetycznych. Jeżeli zakłócenia na punkcie polowym (pomiarowym) i referencyjnym nie są skorelowane, ich wpływ na estymatę impedancji zostanie wyeliminowany. W praktyce okazuje się jednak, że w przypadku dominującego charakteru zakłóceń na punkcie pomiarowym, a tym samym braku koherencji pomiędzy przebiegami czasowymi składowych polowych i referencyjnych, referencyjne przetwarzanie danych okazuje się nieskuteczne.

Estymacja składowych tensora impedancji w metodzie referencyjnej

Przebiegi czasowe $f(t)$ wariacji ziemskiego pola elektromagnetycznego rejestrowane aparaturami magnetotellurycznymi mogą być, jak wspomniano powyżej, reprezentowane przez szereg Fouriera

$$f(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos 2\pi f_i t + \sin 2\pi f_i t.$$

Powyższe sumowanie można zapisać w postaci zespolonej

$$f(t) = \sum_{i=1}^N F_i e^{2\pi f_i t},$$

gdzie

$$F_i = a_i + ib_i.$$

Współczynniki $a_i + b_i$ są obliczane w praktyce przy użyciu algorytmu FFT. Gdy nie ma efektów obcinania i zakłóceń, a szeregi czasowe są reprezentowane przez pomiary $E(t)$ i $H(t)$, impedancję można zapisać w następujący sposób (Morrison 1997)

$$Z(f_i) = \frac{E(f_i)}{H(f_i)} = \frac{a_i + ib_i}{c_i + id_i}.$$

W praktyce wartości E i H są obciążone szumem losowym

$$E_T = E + \eta_E, \quad H_T = H + \eta_H,$$

gdzie η_E i η_H – szумы losowe.

Wykorzystując funkcję korelacji krzyżowej dla wariacji elektrycznych i magnetycznych, można zapisać

$$E_T H_T^* = \overline{(E + \eta_E)(H + \eta_H)^*} = \overline{EH}^* + \overline{E\eta_H}^* + \overline{\eta_E H}^* + \overline{\eta_E \eta_H}^*,$$

gdzie $*$ oznacza wartość sprzężoną.

Przy założeniu, że w powyższym wyrażeniu uśrednianie wartości losowych i nieskorelowanych dąży do zera, można otrzymać wartość nieobciążoną żadnym szumem

$$\overline{E_T H_T^*} = \overline{EH}^*.$$

Na podstawie powyższych założeń można poprawić wyrażenie na impedancję ($Z = E/H$), uśredniając i mnożąc licznik oraz mianownik przez H^*

$$Z = \frac{\overline{EH}^*}{\overline{HH}^*}.$$

Otrzymana w ten sposób wartość impedancji jest jednak zaniżona, gdyż mianownik jest obciążony szumem (wartości η_H i η_H^* są skorelowane). Aby wyeliminować tę niedogodność, wprowadza się, równoczesne z pomiarami na profilu, pomiary składowych magnetycznych pola (H_R) w punkcie odniesienia (punkcie referencyjnym).

Wykorzystując pole magnetyczne w punkcie odniesienia ($H = T_{HR}$) z nieskorelowanym szumem (η_{HR}), można poprawić wyrażenie na impedancję

$$Z = \frac{\overline{E_T H_R}^*}{\overline{H T H_R}} = \frac{\overline{E (H_R + \eta_{HR})}^*}{\overline{H (H_R + \eta_{HR})}^*} = \frac{\overline{E H_R}^*}{\overline{H H_R}^*}.$$

Otrzymuje się w ten sposób poprawną, nieobciążoną żadnym szumem wartość, którą można następnie wykorzystać do wyznaczania wartości oporności pozornej.

WPLYW LOKALIZACJI PUNKTU REFERENCYJNEGO NA KRZYWE MT W KARPATACH

Punkt referencyjny powinien spełniać pewne wymagania. Minimalnym wymaganiem jest niekoherentność zakłóceń na punkcie polowym i referencyjnym. Warunki optymalne to brak zakłóceń i dobra koherencja pola magnetotellurycznego, oraz nieliniowość polaryzacji pola magnetycznego (Hattingh 1989, White *et al.* 2001).

Odrębnym problemem jest określenie odległości punktu pomiarowego i referencyjnego (Shalivahan & Bhattacharya 2002). Minimalną odległość narzuca warunek niekoherentności sygnałów zakłócających, a maksymalną określa wymaganie koherentności pola użytecznego. Zaburzenia pola elektrycznego przez niejednorodności rozkładu oporności powodują brak koherencji pomiędzy składowymi magnetycznymi, często na niewielkich odległościach. Pole magnetyczne na ogół jest koherentne na rozległych obszarach. Problemem może być liniowa polaryzacja pola magnetotellurycznego, występuje jednak ona w obszarach o silnych kontrastach oporności w strefie przypowierzchniowej, a więc w obrębie starych tarcz kontynentalnych lub głębokich rowów podmorskich.

Pomiary badawcze nad wpływem lokalizacji punktu referencyjnego wykonano w ramach realizacji ciągłego profilu magnetotellurycznego Hermanowa – Malawa w 2004 roku. Rejestracje przebiegów czasowych wykonywano równocześnie w trzech punktach, oddalonych od siebie od kilkunastu do kilkuset kilometrów (Fig. 6 na wklejce).

Przyjęto następujący sposób lokalizacji punktów pomiarowych, nazywanych w dalszej części rozdziału:

- **punkt profilowy (HM1–HM10)** – sondowanie MT umiejscowione wzdłuż ciągłego profilu magnetotellurycznego pomiędzy otworami wiertniczymi Hermanowa-1 i Malawa-3, na południe od Rzeszowa na punkcie profilowym wykonywano rejestrację aparaturą 10-kanałową (osiem składowych elektrycznych i dwie składowe magnetyczne);
- **punkt referencyjny Berezka** – stały punkt referencyjny znajdujący się w miejscowości Berezka k. Leska, około 100 km od punktu profilowego; w Berezce rejestrowano tylko dwie poziome składowe magnetyczne pola magnetotellurycznego;
- **punkt referencyjny mobilny** – punkty pomiarowe rozmieszczone wzdłuż wschodniej granicy Polski w miejscowościach: Berźniki (na północy), Kozioł, Rutka, Kulczyn, Liscki i Wesoła (na południu); na punktach referencyjnych mobilnych rejestrowano dwie prostopadłe składowe elektryczne i dwie magnetyczne.

Taka metodyka, przyjęta w zasadzie z powodów ekonomicznych i logistycznych wiązała się z pewnymi konsekwencjami. Przesuwanie punktu profilowego wzdłuż profilu powodowało, że pomiar względem punktu referencyjnego mobilnego mógł nie być porównywalny dla różnych jego lokalizacji, jako że na zakłócenia składa się wiele zróżnicowanych czynników, zarówno o skali lokalnej, jak i regionalnej. Trudno więc przyjąć założenie, że pomiary na punktach profilowych wykonane były w tych samych warunkach. Bardzo pomocna w ocenie jakości danych stała się więc rejestracja przebiegów czasowych na punkcie referencyjnym w Berezce. Pozwoliła ona na „wiązaną” (parametryzowaną) wyników pomiarów na punktach profilowym i mobilnym. Innym problemem, z jakim spotkali się wykonawcy zadania, było jego nowatorstwo, co przekładało się na trudności z lokalizacją punktów referencyjnych mobilnych. Brak wysokoczęstotliwościowych danych magnetotellurycznych rejestrowanych we wschodniej Polsce determinował lokalizację sondowań testowych, jako zależną od wiedzy i wycucia operatora. Tutaj jednak, często po wielokrotnych zmianach lokalizacji, udało się wybrać kilka punktów o zadowalająco niskim poziomie zakłóceń, co pozwoliło autorom przyjąć założenie, że jakość przedstawionych w dalszej części wyników przetwarzania zależy w większym stopniu od odległości punktu referencyjnego, a w mniejszym od jego „charakterystyki elektromagnetycznej”.

Do analiz wykorzystano synchroniczne rejestracje przebiegów czasowych, które wykonane były równocześnie na trzech analizowanych punktach. Były to pasma oznaczone zgodnie z terminologią systemu magnetotellurycznego MT-1 (EMI): *ts4* – rejestracja o długości 1.2 minuty, z krokiem próbkowania 500 Hz, *ts3* – rejestracja o długości 72 minuty z krokiem próbkowania 32 Hz, oraz *ts2* – rejestracja o długości od 4 do 7 godzin z krokiem próbkowania 5 Hz. Processing wykonano w sposób standardowy, bez decymacji, bez selekcji zakłóconych okien czasowych i zaawansowanych procedur (np. „robust”) na tych samych fragmentach czasowych dla każdego z trzech punktów. Metodykę taką przyjęto, aby zminimalizować subiektywny wpływ interpretatora na jakość wyników. Rezultatem takiego przetwarzania są krzywe amplitudowe i fazowe pozwalające na ocenę wpływu odległości punktu referencyjnego od punktu pomiarowego, oraz analizę zakłóceń na tych punktach. Analizę wyników przeprowadzono wielowariantowo. Krzywe sondowań obliczano, traktując kolejne sondowania zarówno jako punkty „polowe”, jak i „referencyjne”.

Wyniki uzyskane w rezultacie przeprowadzonych testów nie pozwalają na wyciągnięcie jednoznacznych wniosków. W tej skali wykonanego przedsięwzięcia trudno jest ocenić, czy zależność odległości punktu referencyjnego od sondowania magnetotellurycznego w sposób prosty lub odwrotny wpływa na jakość uzyskanych krzywych. I tak, dla punktu referencyjnego mobilnego Berezniaki, oddalonego od punktu profilowego o około 700 km na północ, widoczna jest nieznaczna poprawa jakości krzywych, szczególnie dla wysokich częstotliwości (Fig. 7 na wklejce). Zależność ta nie jest już tak widoczna na kolejnych dwóch punktach referencyjnych mobilnych zarejestrowanych w miejscowości Koziół (dla dwóch osobnych punktów profilowych HM2 i HM3). Przesuwając się dalej na południe, poprzez punkty referencyjne mobilne w miejscowościach Rutka i Kulczyn, także nie widzi się wyraźnej różnicy pomiędzy krzywymi odnoszonymi do nich i do pomiarów w Berezce. Kolejne, w kierunku południowym, sondowanie w miejscowości Liski jest trudne do analizy ze względu na bardzo słabą jakość danych na punkcie profilowym. Ostatni, najbliższy z testowanych punktów referencyjnych mobilnych, położony w miejscowości Wesoła kilkanaście kilometrów na południe od punktu profilowego, także daje rezultaty porównywalne do uzyskanych w odniesieniu do punktu referencyjnego w Berezce.

Można by na tej podstawie wysunąć wniosek, że wystarczy oddalić punkt referencyjny o około 20 kilometrów od punktu profilowego, aby wyeliminować wpływ lokalnych zakłóceń koherentnych. Jest to jednak wniosek zbyt ryzykowny ze względu na małą ilość przetestowanych obiektów i specyficzny charakter geologii Karpat oraz infrastruktury regionu badań (lokalizację dużych miast, kierunki przebiegu zelektryfikowanych linii kolejowych, dróg itp.). Z większą pewnością można natomiast powiedzieć, że obszar poszukiwania punktu referencyjnego dla badań magnetotellurycznych w polskich Karpatach Wschodnich można ograniczyć do promienia ok. 50 kilometrów od profilu pomiarowego.

METODY POPRAWY PRZEBIEGÓW CZASOWYCH – FILTRY SAVITZKY’EGO–GOLAYA I PROCEDURA SSA

Do uzyskania wiarygodnych wyników w postaci krzywych sondowań magnetotellurycznych wymagane jest spełnienie kilku warunków pomiarowych (np. odpowiedni czas rejestracji, właściwy wybór stanowiska pomiarowego) oraz zastosowanie dodatkowych narzędzi na etapie przetwarzania danych. Do narzędzi tych należy niewątpliwie filtracja cyfrowa w domenie czasu lub częstotliwości. Zasadniczym celem filtracji jest oddzielenie sygnału od zakłóceń. Filtr jest więc procesem fizycznym, który działając na przebieg czasowy, modyfikuje zazwyczaj jego własności w ściśle określony sposób. Poniżej przedstawiono dwa sposoby filtracji przebiegów czasowych oraz ich wpływ na przetwarzanie danych magnetotellurycznych.

Filtry Savitzky’ego–Golaya

Wyglądające filtry Savitzky’ego–Golaya zostały po raz pierwszy opisane w 1964 roku (Savitzky & Golay 1964). Zaproponowana w nich metoda sprowadza się do zastosowania lokalnej regresji wielomianowej w celu uzyskania wygładzonej wartości konkretnego punktu szeregu czasowego, przy czym obliczenia dla każdego pojedynczego punktu zachodzą niezależnie od wszystkich pozostałych. W szczególności wyniki uzyskane w efekcie zastosowania tego typu filtracji cechują się lepszym odwzorowaniem maksimów i minimum danych wyjściowych, niż to ma miejsce w przypadku procedur klasycznego wygładzania danych (np. średniej ruchomej, która może być opisana jako szczególny przypadek prostego filtru Savitzky’ego–Golaya).

Wartości kolejno wyliczanych punktów określane są typowo jako pewna liniowa kombinacja wartości danego punktu i punktów otaczających

$$g_i = \sum_{n=-n_L}^{n_R} c_n f_{i+n},$$

gdzie:

- g_i – wyliczana i -ta wartość poprawionego szeregu czasowego,
- n_L i n_R – liczba punktów, odpowiednio, w lewo i w prawo od punktu i ,
- c_n – współczynnik filtru,
- f_i – dane wejściowe.

W przypadku filtrów Savitzky'ego–Golaya wartości kolejnych współczynników filtru obliczane są z następującej zależności

$$c_n = \left\{ \left(A_T A \right)^{-1} \left(A^T e_n \right) \right\}_0,$$

przy czym:

$$A_{ij} = i, \quad i = -n_L, \dots, n_R, \quad j = 0, \dots, M,$$

gdzie M – rząd wielomianu.

Procedura SSA (*Singular Spectrum Analysis*)

Procedura SSA jest dość złożona numerycznie i może być realizowana na kilka sposobów. Jednym z najpopularniejszych jest algorytm opisany przez R. Vautarda, P. Yiu i M. Ghila (Vautard *et al.* 1992). Zakłada on, że dla standaryzowanego szeregu czasowego x_i gdzie i zmienia się od 1 do N i maksymalnego przesunięcia (czasem zwanego oknem) M , tworzy się macierz Toeplitza, wykorzystując następujący wektor

$$c_j = \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} x_i x_{i+j}, \quad 0 \leq j \leq M-1.$$

Następnie obliczane są wartości i wektory własne tej macierzy (odpowiednio λ_k i E_j^k , przy czym j i k zmieniają się od 1 do M). Mogą być one odzyskane na przykład na drodze dekompozycji względem wartości szczególnych SVD (*Singular Value Decomposition*) (Press *et al.* 1992). Uzyskane wartości własne są następnie sortowane w kolejności rosnącej, a odpowiadające im wektory własne służą do obliczenia kolejnych składowych głównych

$$a_i^k = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M x_{i+j} E_j^k \quad 0 \leq i \leq N-M.$$

Na bazie powyższych wartości można następnie wyliczyć kolejne składowe sygnału źródłowego. Zrekonstruowana k -ta składowa obliczana jest z następującej relacji

$$x_i^k = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M a_{i-j}^k E_j^k, \quad M \leq i \leq N-M+1.$$

Wcześniejsze posortowanie wartości własnych λ_k powoduje, że dla kolejnych k otrzymujemy składowe sygnału od najbardziej do najmniej znaczących. Zsumowanie wszystkich k wartości powoduje odtworzenie sygnału źródłowego w jego pierwotnej postaci.

Powyższe procedury można wykorzystać zarówno do poprawy jakości danych, które następnie zostają poddane wybranej procedurze przetwarzania, jak i do wstępnej analizy danych pozwalającej na określenie pasm częstotliwości, które mogą być traktowane w dalszym processingu jako zakłócone. Figury 8 i 9 przedstawiają wpływ omawianych filtrów na przykładowy surowy sygnał magnetotelluryczny w domenie czasu i częstotliwości.

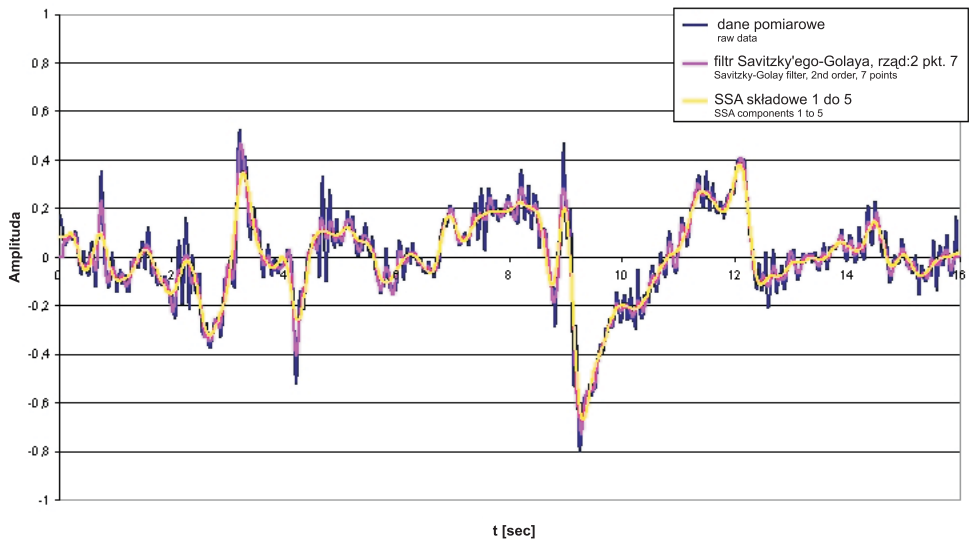


Fig. 8. Efekt działania procedury SSA oraz filtrów Savitzky'ego-Golaya na tle surowych danych magnetotellurycznych (przebiegów czasowych)

Fig. 8. Effects of SSA and Savitzky–Golay filters shown with raw MT data (time series)

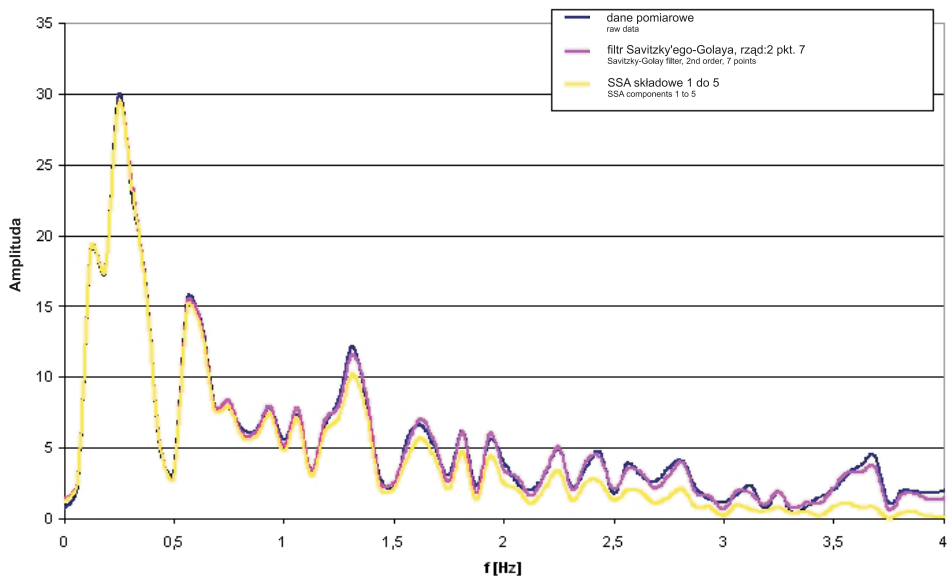


Fig. 9. Widmo częstotliwościowe przebiegu czasowego przed i po zastosowaniu filtrów Savitzky'ego-Golaya i procedury SSA

Fig. 9. Time series frequency spectrum before and after applying Savitzky–Golay filters and SSA

Uzyskane w ten sposób dane mogą posłużyć do określenia przedziałów częstotliwościowych, dla których dokonywane będzie dalsze przetwarzanie. Kryterium decydującym o zaliczeniu ich do danego przedziału może być odpowiedni procent amplitudy początkowej. Przykład takiej analizy dla powyższych przykładowych danych przedstawiono na figurze 10.

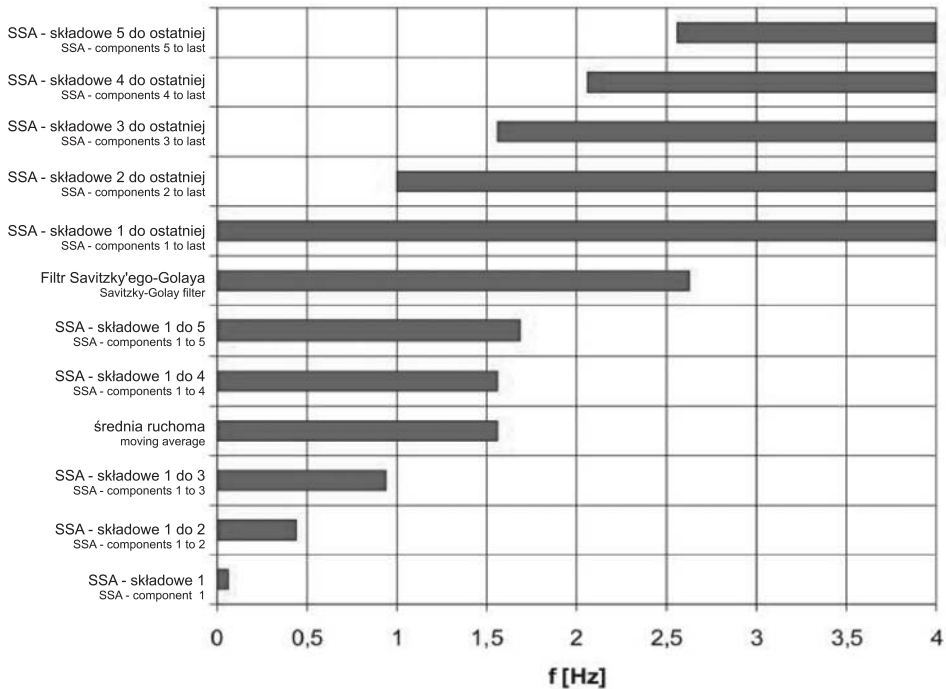


Fig. 10. Zakresy częstotliwościowe obliczone dla różnych składowych z użyciem kilku typowych filtrów
Fig. 10. Frequency ranges calculated for different components with the use of several standard filters

Analiza przebiegów czasowych z wykorzystaniem filtrów Savitzky'ego–Golaya oraz procedury SSA przeprowadzona została na wybranych fragmentach rejestracji z obszaru polskiej części Karpat, charakteryzujących się dużym błędem estymaty tensora impedancji w zakresie martwego pasma (Danek *et al.* 2006). Podjęto także próby zaaplikowania wymienionych metod do przebiegów czasowych silnie zakłóconych przez zelektryfikowane linie kolejowe. O ile jednak można mówić o poprawie rejestracji składowych magnetycznych, o tyle specyficzne „podbicie amplitudy” dla kanałów elektrycznych wydaje się obecnie – poza zasięgiem efektywnego działania wspomnianych procedur. Nieznaczna poprawę w korekcji przebiegów czasowych zaobserwowano po zastosowaniu procedury SSA dla rejestracji niskoczęstotliwościowej (krok próbkowania 5 Hz). Przebiegi czasowe silnie zakłóconych składowych magnetycznych z punktu połowego po zastosowaniu procedury SSA wykazują znacznie większe podobieństwo do synchronicznie zarejestrowanych przebiegów czasowych składowych magnetycznych na punkcie referencyjnym (Fig. 11).

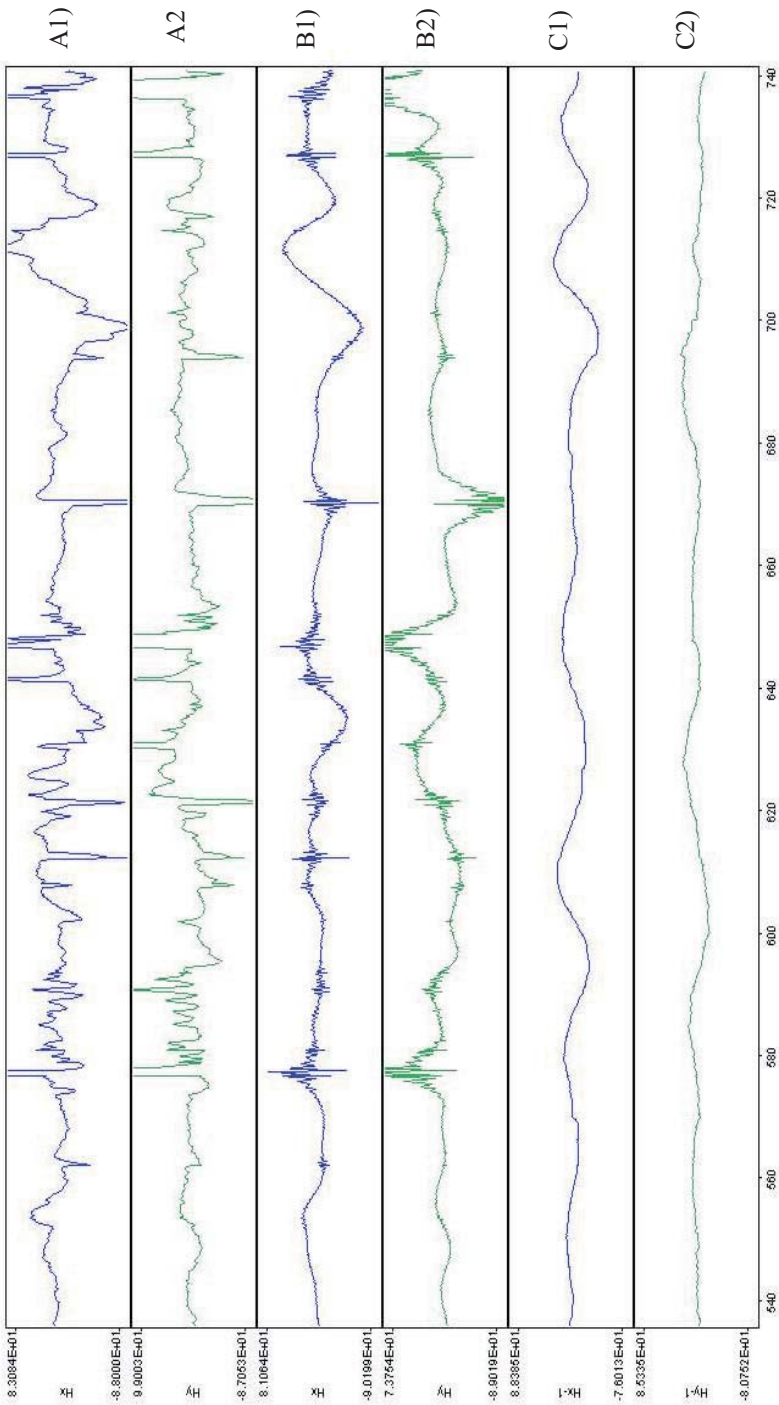


Fig. 11. Przebiegi czasowe H_x (1) i H_y (2) zarejestrowane w punkcie połowym położonym w pobliżu zelektryfikowanej linii kolejowej i na wolnym od zakłóceń punkcie referencyjnym. A1), A2) przebiegi czasowe przed zastosowaniem procedury SSA; B1), B2) przebiegi czasowe po zastosowaniu procedury SSA; C1), C2) przebiegi czasowe z punktu referencyjnego

Fig. 11. Time series H_x (1) and H_y (2) recorded at a measurement site located near electric railway line and at noise-free remote reference site. A1), A2) time series before applying SSA; B1), B2) time series after applying SSA; C1), C2) time series recorded at remote reference site

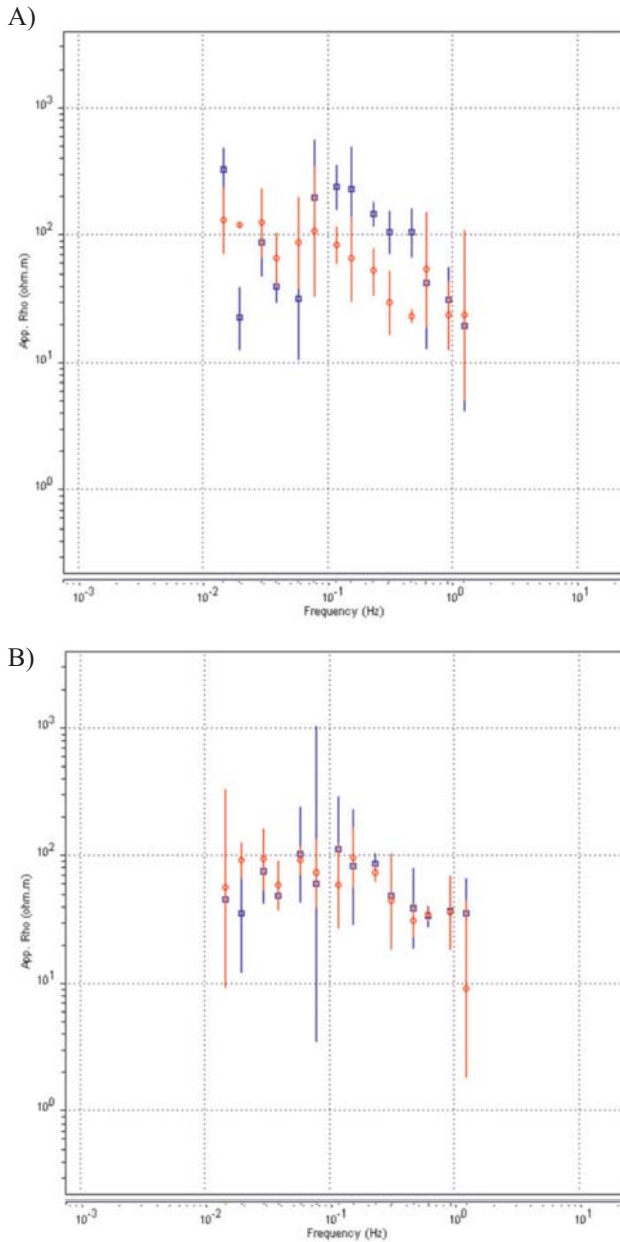


Fig. 12. Krzywe amplitudowe sondowania magnetotellurycznego wykonanego w pobliżu linii kolejowej otrzymane z przebiegu czasowego o kroku próbkowania 5 Hz przed zastosowaniem procedury SSA (A) i po zastosowaniu procedury SSA wycinającej składowe 1 do 5 (B)

Fig. 12. Amplitude curves of MT sounding made near railway line obtained from time series with sampling step of 5 Hz, before applying SSA (A) and after applying SSA that cut off components 2 to 5 (B)

Analizę tę wykonano dla punktu pomiarowego znajdującego się około 5 km od trakcji kolejowej. Rejestracje przebiegów czasowych poprawiono, stosując wycinanie składowych od: 2. do 15., następnie obliczono krzywe amplitudowe i porównano je z krzywymi obliczonymi bez zastosowania procedury SSA (Fig. 12). Procedura SSA w zastosowaniu do przebiegów czasowych pola magnetotellurycznego na obecnym etapie wymaga jednak dalszych prac, które jednoznacznie potwierdziłyby jej przydatność.

Drugim problemem w stosowaniu SSA jest brak procedury, która w sposób automatyczny, bez ingerencji interpretatora oceniałaby, które składowe charakteryzują zakłócenia, a które sygnał użyteczny. Zastosowanie SSA wymaga więc wielu prób dla poszczególnych składowych, selektywnie dla każdego przebiegu czasowego, co przy dużej ilości danych wydaje się przedsięwzięciem czasochłonnym, a przez to mało ekonomicznym.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzenie badań magnetotellurycznych uwarunkowane jest obecnie nie tylko możliwościami technicznymi aparatów rejestrujących, lecz przede wszystkim możliwościami zastosowania metody na obszarach o wysokim stopniu urbanizacji. Do takich obszarów należą Karpaty, szczególnie w strefie marginalnej nasunięcia, która przebiega w pobliżu zelektryfikowanej trakcji kolejowej Kraków – Przemyśl. Perspektywiczność tego obszaru oraz trudności w wykonywaniu badań sejsmicznych zmuszają do poszukiwania innych alternatywnych metod geofizycznych, np. metody magnetotellurycznej. Efektywna interpretacja krzywych sondowań MT w takim obszarze musi być poprzedzona wykorzystaniem zaawansowanych technik służących wydzieleniu sygnału użytecznego z tła zakłóceń. Niekorzystne jest również, że istotny dla prawidłowej interpretacji fragment krzywej znajduje się w obrębie tzw. „martwego pasma”.

Przetwarzanie danych zakłóconych z obszaru nasunięcia karpackiego powinno być wykonywane z zastosowaniem wszelkich procedur eliminujących zakłócenia. Należą do nich niewątpliwie pomiar i processing referencyjny. Wybór odpowiedniej lokalizacji punktu referencyjnego powinien być poprzedzony szeregiem testów, gdyż nie jest znany oczywisty wpływ odległości pomiędzy punktem polowym i referencyjnym na wynik przetwarzania. Przyczyna tego tkwić może, oprócz wpływu urbanizacji, w specyficznej geologii orogenu karpackiego. Przeprowadzone testy wykazały, że nie ma istotnej różnicy pomiędzy punktem referencyjnym znajdującym się kilkanaście kilometrów od punktu pomiarowego, jak i położonym około 700 km dalej, w odmiennej jednostce geologicznej. Istnieje przypuszczenie, że zakłócenia elektromagnetyczne mogą być zarówno tłumione, jak i wzmacniane w niektórych kompleksach skalnych.

Oprócz stosowania metody referencyjnej istotna wydaje się też poprawa sygnału w domenie czasu oraz częstotliwości poprzez stosowanie różnego rodzaju filtrów numerycznych. Słusznym podejściem wydaje się zastosowanie procedur poprawiających jakość estymaty tensora impedancji. Należy przez to rozumieć processing referencyjny typu „robust” po uprzednim zastosowaniu selekcji przebiegów czasowych wraz z ich filtracją numeryczną (tj. filtry wcięciowe, adaptywne, SSA, filtry Savitzky’ego–Golaya itp). Nie można też zapominać że, estymacja impedancji ma charakter statystyczny, a więc do uzyskania reprezentatywnej próby potrzeba odpowiednio dużej liczby elementów, którą zapewnia wystarczająco długi czas rejestracji.

Artykuł opracowany został w wyniku 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 oraz 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.
- Danek T., Stefaniuk M. & Wojdyła M., 2006. Examples of using singular spectrum analysis in magnetotelluric data processing. *18th International Workshop on Electromagnetic induction in the earth*, El Vendrell 17–23.09.2006, Universitat de Barcelona, S1, 2–11.
- Egbert G.D. & Booker J.R., 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer function. *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 87, 173–194.
- Ernst T., 1981. A comparison of two methods of the transfer function calculation using least-square criterion in time and frequency domain. *Publications of Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences*, 143, 13–24.
- Ernst T., Sokolova E.Y., Varentsov I.M. & Golubev N.G., 2001. Comparison of two techniques for magnetotelluric data processing using synthetic data sets. *Acta Geophysica Polonica*, XLIX, 213–243.
- Gamble T.D., Goubau W.M. & Clarke J. 1979. Magnetotellurics with a remote magnetic reference. *Geophysics*, 44, 53–68.
- Hattingh M., 1989. The use of data-adaptive filtering for noise removal on magnetotelluric data. *Physics of the Earth and Planetary Interior*, 53, 239–254.
- Morrison H.F., 1997. *Review of magnetotellurics: Principles and applications* (manuskrypt wykładu wygłoszonego w Warszawie 19.09.1997). 1–98.
- Nichols E.A., Morrison H.F. & Clarke J., 1988. Signal and noise in measurements of low-frequency geomagnetic fields. *Journal of Geophysical Research*, 93, B11, 13.743–13.754.
- Oettinger G., Haak V., Larsen J.C. & 2001. Noise reduction in magnetotelluric time-series with a new signal-noise separation method and its application to a field experiment in the Saxonian Granulite Massif. *Geophysical Journal International*, 146, 659–669.
- Palshin N.A., Smirnov M.Y. & EMTESZ-Pomerania Working Group, 2005. Characterization of the cultural electromagnetic noise. *Publications of Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences*, C-95(386), 97–95.
- Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. & Flannery B.P., 1992. *Numerical Recipes in C: the art of scientific computing*. Second edition, Cambridge University Press, 1–278.

- Santarato G. & Iliceto V., 1997. On the interference of artificial electromagnetic fields in the magnetotelluric “dead band”. *59th EAGE Conference*, Genewa 26–30.05.1997, Extended Abstracts, 1, FO 24.
- Savitzky A. & Golay J.E., 1964. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, 36, 1627–1639.
- Semenov V.T., 1985. *Obrabotka dannykh magnitotelluričeskogo zondirovanija*. Nedra, Moskwa, 1–134.
- Shalivahan & Bhattacharya B.B., 2002. How remote can the far remote reference site for magnetotelluric measurements be? *Journal of Geophysical Research*, 107, B6, 2105, 1–8.
- Simpson F. & Bahr K., 2005. *Practical Magnetotellurics*. Cambridge University Press, 1–245.
- Stefaniuk M., 2003. Regionalne badania magnetotelluryczne w polskich Karpatach wschodnich. *Geologia* (kwartalnik AGH), 29, 3–4, 131–168.
- Stefaniuk M., Klityński W. & Wojdyła M., 2003. Szczegółowe badania magnetotelluryczne metodą profilowań ciągłych w rejonie Raciechowice – Stadniki (polskie Karpaty zachodnie). *Geologia* (kwartalnik AGH), 29, 3–4, 253–279.
- Stefaniuk M., Pokorski J., Czerwiński T. & Wojdyła M., 2006. Regional magnetotellurical profile crossing structures of Central Poland: initial results. *18th International Workshop on Electromagnetic induction in the earth*, El Vendrell 17–23.09.2006, Universitat de Barcelona, S1, 8–15.
- Varentsov I.M. & Sokolova E.Y., 2004. The multi-site estimation of MT/GDS transfer functions with horizontal magnetic control. *17th International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth (Abstracts)*, 150.
- Vautard R., Yiou P. & Ghil M., 1992. Singular-spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals. *Physica*, D58, 95–126.
- White B.S., Kohler W.E., Srnka L.J., 2001. Random scattering in magnetotellurics. *Geophysics*, 66, 1, 188–201.
- Weckmann U., Magunia A. & Ritter O., 2005. Effective noise separation for magnetotelluric single site data processing using a frequency domain selection scheme. *Geophysical Journal International*, 161, 635–652.
- Wielądek R. & Ernst T., 1977. Application of the method of least squares to determining impulse responses and transfer functions. *Publications of Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences*, G-1(110), 3–12.

Summary

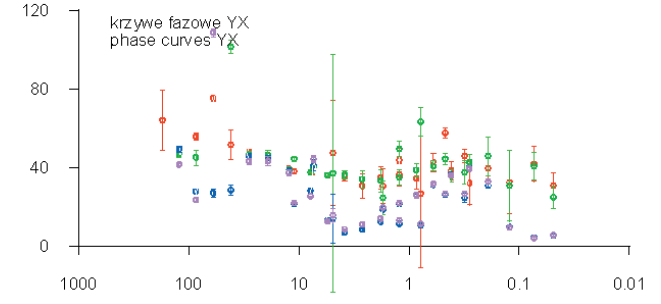
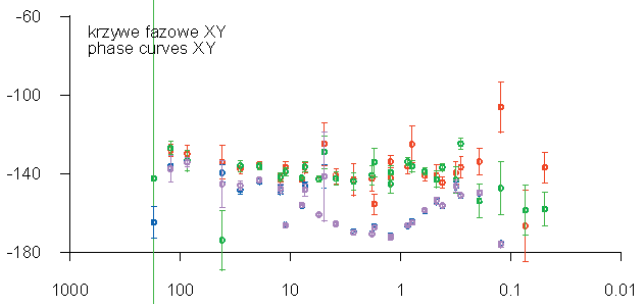
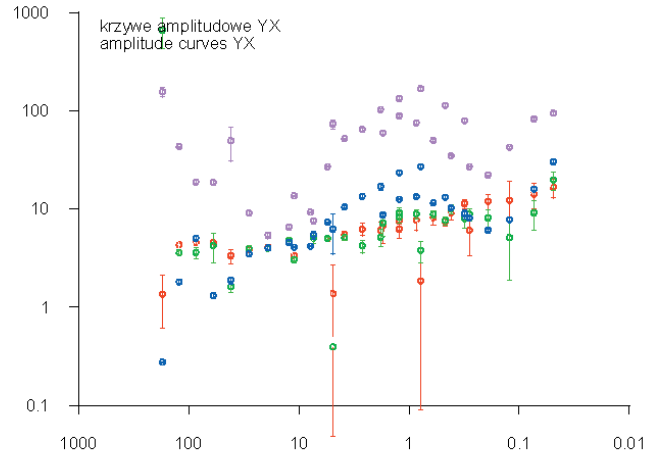
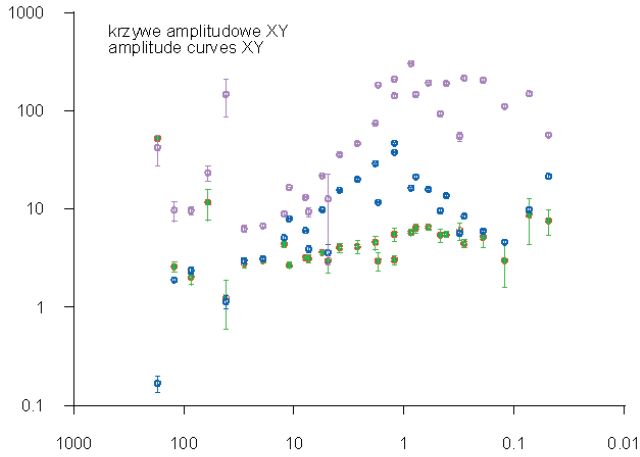
The magnetotelluric method (MT) undergoes a rapid development in the last several years. An unquestionable disadvantage of that method is that it is prone to electromagnetic noise that is inherently present at urban areas. Because of their great power and wide range, reaching to several dozen kilometers, EM fields generated by electric railway lines are most

undesirable since they impede the application of noise elimination procedures (Fig. 1). A noisy signal, propagating to a considerable distance, undergoes modification and practically cannot be distinguished from natural EM field variations. Usually, the effect of such distant sources is a non-proportional amplification of the electric field, and hence of the amplitude of impedance tensor components, particularly in the case of low frequencies (Fig. 2). An example of the effects of electromagnetic noise generated by electric railway lines is shown in MT sounding curves obtained from measurements made near the Bucznik-1 well. The field curve runs markedly higher above a model curve calculated for a geoelectric model obtained from well-log data analysis (Fig. 3).

More and more advanced data processing procedures are applied to eliminate effects of the electromagnetic noise. The most important ones include remote reference processing, time series selection, and regression methods of impedance estimation (Fig. 4). One problem of MT data acquisition is establishing a distance between a measurement site and a reference site. Studies of the influence of reference site location were made at the continuous MT profile Hermanowa-Malawa. Time series were recorded simultaneously at three sites, located at a distance from several to a few dozen kilometers from one another (Fig. 5). Such processing gave sounding curves, which enabled the effects of a distance between reference site and measurement site to be evaluated and noise analysis at those sites to be made. The sounding curves were calculated treating successive sounding sites both as “field sites” and “reference sites” (Fig. 6 on the interleaf). Test measurements showed that the reference site seeking in the Eastern Carpathians could be limited to an area with a 50 km radius from the measurement line (Fig. 7 on the interleaf).

To obtain reliable results of MT measurements in the form of MT sounding curves it is necessary to employ additional tools at the processing stage. Those tools undoubtedly include the numerical filtering in time domain or frequency domain. The time series analysis with the use of the Savitzky–Golay filters and Singular Spectrum Analysis (SSA) was made for selected records from the Carpathians, for which impedance tensor estimates had big errors. Figures 8 and 9 show the influence of those filters on a raw magnetotelluric signal in the time domain and frequency domain. The obtained results can be used to establish frequency ranges for which further data processing will be made. Classifying to a given range can be based, for instance, at a required per cent of the initial amplitude (Fig. 10). An attempt to apply the above mentioned methods to time series with strong noise due to electrified railway lines was also made (Fig. 11). Time series records were corrected by means of SSA procedure, and then amplitude curves were calculated and compared with curves calculated in the standard way (Fig. 12).

Punkt profilowy HM1
Field site HM1



Sondowanie testowe w Bereźnikach
Tested sounding site in Bereźniki

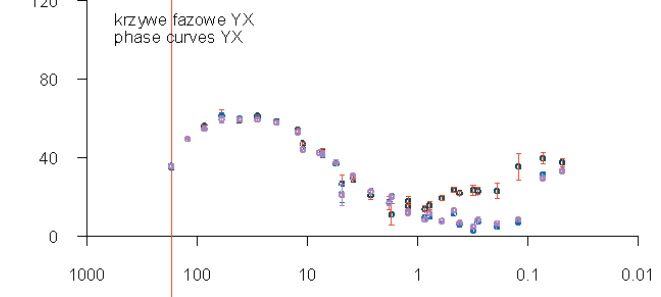
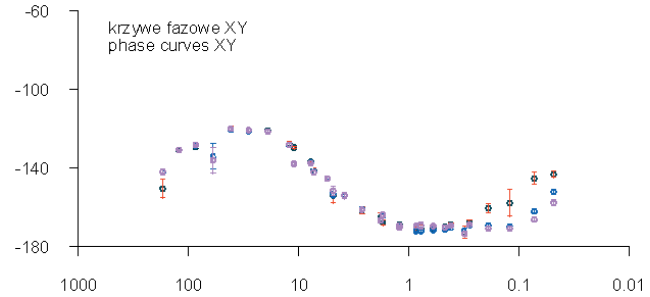
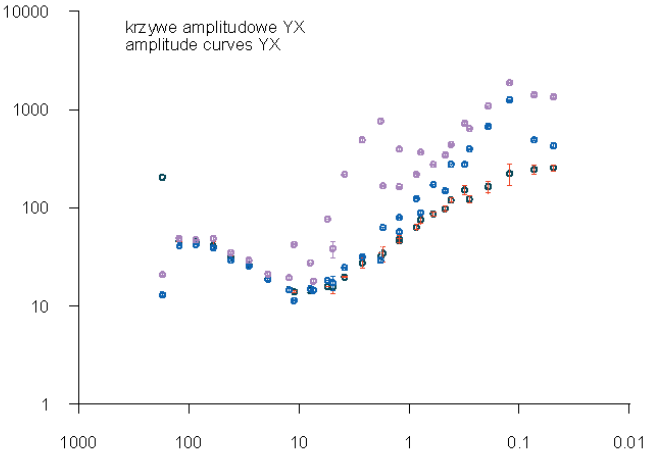
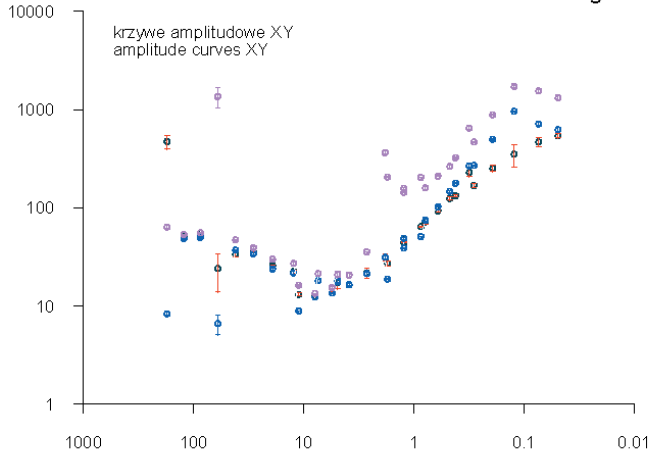


Fig. 6. Przykład analizy zakłóceń oraz efektu przetwarzania danych dla dwóch punktów referencyjnych (Berźniki i Berezka) rejestrowanych synchronicznie z punktem profilowym HM1

Fig. 6. Example of noise analysis and data processing for two remote reference sites (Berźniki and Berezka) and one field site HM1

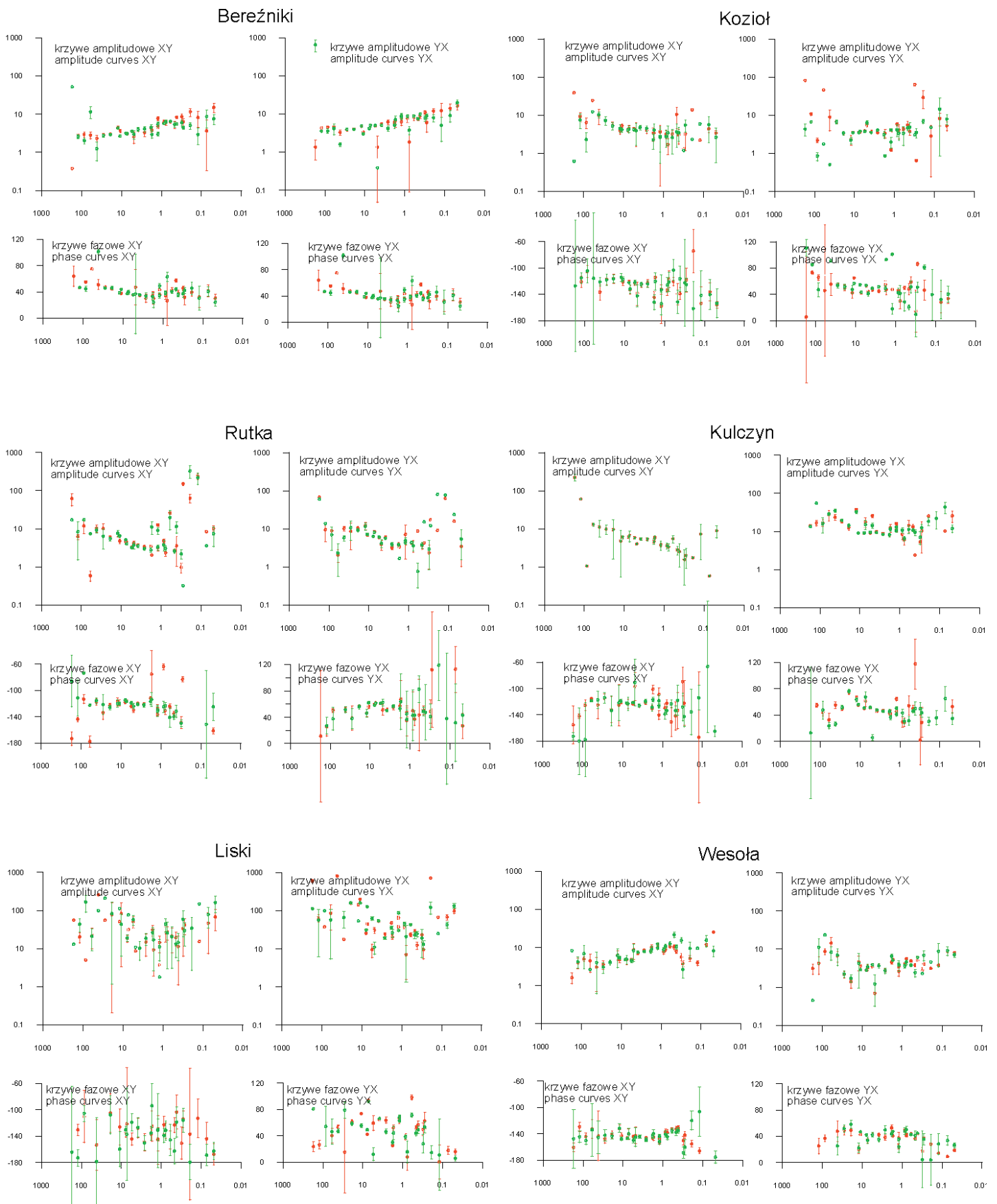


Fig. 7. Zestawienie krzywych amplitudowych i fazowych wykonanych podczas prac testujących zależność odległości punktu referencyjnego od profilu pomiarowego

Fig. 7. Amplitude and phase curves obtained from test measurements, which were made to evaluate effects of remote reference site location on data processing results