

METODA POLARYZACJI WZBUDZONEJ W PROSPEKCJI ZŁÓŻ WĘGLOWODORÓW

Induced polarization method in hydrocarbon prospecting

Marek WOJDYŁA¹, Michał STEFANIUK², Marek SADA¹
& Łukasz SITO¹

¹Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych sp. z o.o.; ul. Jagiellońska 76, 03-301 Warszawa;
e-mail: m.wojdyla@pbg.com.pl, m.sada@pbg.com.pl, l.sito@pbg.com.pl

²AGH Akademia Górniczo-Hutnicza; al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: stefan@geolog.geol.agh.edu.pl

Treść: W artykule przedstawiono metodę polaryzacji wzbudzonej, a w szczególności jej zastosowanie do bezpośredniego wykrywania złóż węglowodorów. Zaprezentowane zostały parametry polaryzacji wzbudzonej, jakie uzyskuje się w pomiarach w domenie czasu i częstotliwości. Przeanalizowana została klasyfikacja skał i minerałów ze względu na parametr polaryzowalności. Przedstawiono pięć przykładów wykorzystania metody polaryzacji wzbudzonej do wykrywania i rozpoznawania złóż węglowodorów przez zagraniczne firmy poszukiwawcze. Omówiona została metodyka prac polowych na obszarze polskich Karpat i zapadliska przedkarpackiego w przypadku zastosowania układu ekwatorialnego i dipolowego układu osiowego. Przeanalizowano mapy rozkładów parametru fazowego uzyskane z pomiarów układem ekwatorialnym w złożach Rudka i Grabownica oraz wykres parametru fazowego wzdłuż profilu przecinającego złożę Ryłowa. Sporządzono przekroje trzech parametrów polaryzacji wzbudzonej uzyskane z pomiarów dipolowym układem osiowym, a następnie przeanalizowano je w kompleksie z przekrojami oporności wyinterpretowanymi na podstawie danych CSAMT.

Słowa kluczowe: polaryzacja wzbudzona, polaryzowalność, parametr fazowy, procentowy efekt częstotliwościowy, złoża węglowodorów, Karpaty, zapadlisko przedkarpackie.

Abstract: The paper presents the method of induced polarization (IP) and focuses on its application to direct prospecting for hydrocarbon deposits. Induced polarization parameters that are obtained from measurements in time domain and frequency domain are presented. Classification of minerals and rocks based on induced polarization parameter was analyzed. Five examples of application of induced polarization method to discovering and recognizing hydrocarbon deposits by foreign companies were given. Methodology of field works made in Carpathians and Carpathian Foredeep with the use of equatorial and dipole-dipole arrays was described. Maps of phase parameter evaluated from results of equatorial array measurements for Grabownica and Rudka deposits as well as the plot of phase parameter along profile cutting the area of Ryłowa deposit were analyzed. Cross-sections of three induced polarization parameters were made and analyzed with CSAMT resistivity sections in the area of Rudka deposit.

Key words: induced polarization, chargeability, phase parameter, percent frequency effect, hydrocarbon deposits, Carpathians, Carpathian Foredeep.

WSTĘP

Metoda polaryzacji wzbudzonej (IP – *Induced Polarization*) jest rozszerzeniem metody elektrooporowej o dodatkowy pomiar zdolności ośrodka geologicznego do gromadzenia ładunków elektrycznych. Metoda ta, pierwotnie stosowana do poszukiwań złóż minerałów rudnych, obecnie jest szeroko stosowana do poszukiwań złóż węglowodorów, a także w geofizyce środowiskowej i inżynierskiej.

W 1927 roku (lub wg niektórych źródeł nawet około roku 1913) Conrad Schlumberger dokonał pierwszych pomiarów nisko częstotliwościowej polaryzowalności ośrodka geoelektrycznego, która była rezultatem wprowadzenia do niego prądu elektrycznego. Pomiar tej „wzbudzonej” polaryzacji i interpretacja jej zmienności w ośrodku geologicznym legły u podstaw metody polaryzacji wzbudzonej (IP). D.F. Bleil (1953) jako pierwszy na łamach pisma *Geophysics* przedstawił praktyczne zastosowanie pomiarów metodą IP, pokazując, że istnieje możliwość mierzenia polaryzacji spowodowanej obecnością rozproszonych złóż minerałów. Od tego czasu obserwuje się dynamiczny rozwój metody polaryzacji wzbudzonej trwający przez całe lata 60. i 70. Rozwój ten odbywał się równolegle zarówno w płaszczyźnie teoretycznej, dzięki zrozumieniu kolejnych mechanizmów/źródeł polaryzacji, jak i w płaszczyźnie technologicznej związanej z zastosowaniem nowych technik pomiarowych, przetwarzania danych pomiarowych i ich interpretacji. Niemniej jednak metoda IP w tych czasach stosowana była głównie do poszukiwań geologicznych związanych ze złożami rud polimetalicznych. Obecnie pozycja metody w tej dziedzinie jest mocno ugruntowana, wprowadzane są natomiast jej aplikacje w geofizyce inżynierskiej, środowiskowej (Ward *et al.* 1995) i w poszukiwaniach złóż węglowodorów (Zhanxiang *et al.* 2005).

Zjawisko polaryzacji wzbudzonej jest najintensywniejsze, gdy w ośrodku geologicznym występują minerały o przewodnictwie elektronowym. Dlatego metoda ta jest jedną z głównych metod geofizycznych przy poszukiwaniach złóż rud. Intensywność anomalii IP jest proporcjonalna do obszaru powierzchni elektronowych przewodników, dlatego też metoda ta pozwala na kartowanie nie tylko masywów rudnych, ale także rudnych złóż żyłowych. Może ona być z powodzeniem stosowana do wykrywania metalowych obiektów technicznych (rurociągów, metalowych rezerwuarów i in). Chemiczne procesy, związane z obecnością węglowodorów w skałach, mogą w pewnych warunkach prowadzić do utworzenia minerałów z elektronowym typem przewodnictwa. Występowanie tego zjawiska umożliwia wykorzystanie metody IP do poszukiwania i kartowania złóż węglowodorów. Ponadto metodę tę wykorzystuje się do rozwiązywania zadań hydrogeologicznych i geologicznych. Podstawą zastosowania metody IP w tej problematyce jest związek zjawiska polaryzacji wzbudzonej z zawartością wody w skałach i jej mineralizacją. Metoda IP znajduje także zastosowanie przy kartowaniu geologicznym, gdzie stosowana jest wspólnie z metodą elektrooporową.

ZAŁOŻENIA TEORETYCZNE METODY POLARYZACJI WZBUDZONEJ

Obiekty geologiczne spolaryzowane pod wpływem impulsu prądu elektrycznego generują zanikający w czasie prąd elektryczny, który może być obserwowany, np. po wyłączeniu prądu wzbudzającego, na powierzchni ziemi. Ponieważ obserwowane obiekty, zależnie od

swojej budowy geologicznej i składu mineralogicznego oraz budowy geologicznej ich otoczenia, generują sygnały polaryzacji pola elektrycznego o różnej amplitudzie i różnym czasie jego zanikania, to pomiar i analiza tych wielkości dają pewną informację o budowie geologicznej. Jednym ze źródeł potencjałów polaryzacji wzbudzonej są procesy elektrochemiczne zachodzące na granicy ciała stałe – roztwór. Adsorpcja i dyfuzja jonów, pojemność warstwy podwójnej i cały szereg innych czynników decyduje o wartości oporności zespolonej skał, których pory wypełnione są przynajmniej częściowo roztworem wodnym.

Mechanizm polaryzowania się przewodników elektronowych i jonowych jest różny. Przewodnik jonowy, jaki tworzą wypełniające pory skał roztwory elektrolitów, polaryzuje się objętościowo (polaryzacji podlega elektrolit i jego ścianki, tzw. polaryzacja membranowa). Polaryzacja przewodników elektronowych (tzw. polaryzacja elektrodowa) może być dwojaka: powierzchniowa, gdy przewodnik stanowi zwartą galwanicznie masę, i objętościowa, gdy jest on rozproszony w skale tak, że jego cząstki przewodzące nie mają galwanicznego połączenia ze sobą. Efekt polaryzacji elektrodowej przewyższa o rząd wielkości efekt polaryzacji membranowej.

Proces powstawania efektu polaryzacji wzbudzonej w sensie makroskopowym można przeanalizować na przykładzie ciała rudnego, nad którym rozstawiony zostaje czteroelektrodowy układ AMNB (Fig. 1A). Przez prądowe elektrody AB w ciągu pewnego czasu Δt przepuszcza się prąd elektryczny (Fig. 1B). Różnica potencjałów na elektrodach odbiorczych MN odpowiada sumarycznemu oddziaływaniu pola pierwotnych prądów (EP) z AB i pola wtórnych prądów E_{IP} (Fig. 1C). Kiedy ustalony prąd przepływający w ośrodku skalnym jest nagle przerwany, napięcie ΔV_p pomiędzy dwoma uziemionymi elektrodami nagle spada do niewielkiej wartości, tzw. napięcia polaryzacji ΔV_s , i dalej zanika asymptotycznie do zera. Podobnie, pod wpływem włączonego prądu mierzone napięcie na początku rośnie gwałtownie, a następnie osiąga wartość ΔV_p asymptotycznie. Chociaż teoretycznie osiągnięcie wartości ΔV_p jest niemożliwe, w praktyce po upływie około jednej sekundy zmiany wartości ΔV_p są niemierzalne. Rejestracja krzywej zaniku odbywa się w czasie Δt (równym $t_f - t_s$).

Miernikiem zdolności ośrodka geologicznego do polaryzowania się jest tzw. parametr polaryzacji M wyrażony najczęściej przez zależność (Ward 1990)

$$M = \frac{\int_{t_s}^{t_f} V_s dt}{V_p} \quad [\text{ms}] \quad (1)$$

Wynikiem pomiaru są wartości parametru M wyrażone w milisekundach i liczone jako pole pod krzywą zaniku napięcia.

W praktyce parametr zdolności skały do polaryzacji M określa się, mierząc różnicę potencjałów V_p w chwili przepływu prądu i różnicę potencjałów V_s w pewnym czasie po wyłączeniu prądu

$$M = \frac{\Delta V_s}{\Delta V_p} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2)$$

Parametr ten odzwierciedla intensywność procesu IP.

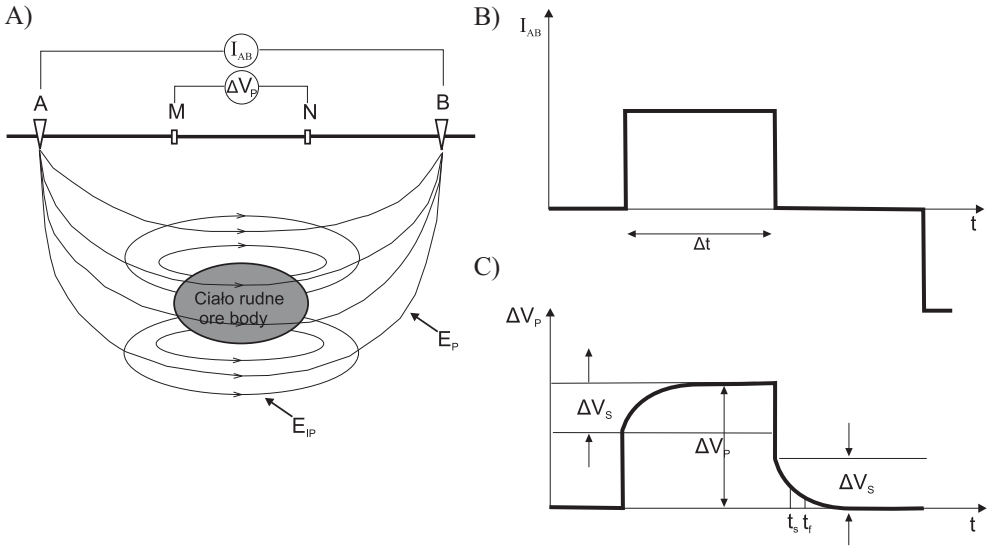


Fig. 1. Reakcja polaryzowanego środowiska na prostokątny impuls prądowy: A) układ pomiarowy; B) zapis impulsów prądowych (AB); C) pomiar napięcia na linii MN: A, B – elektrody prądowe, M, N – elektrody pomiarowe, E_P – natężenie pola elektrycznego pochodzące od prądów pierwotnych, E_{IP} – natężenie pola elektrycznego pochodzące od prądów wtórnych, ΔV_S – napięcie polaryzacji, ΔV_P – napięcie całkowite, I_{AB} – natężenie prądu, Δt – czas trwania impulsu prądowego, $t_f - t_s$ – okno czasowe pomiaru napięcia polaryzacji

Fig. 1. Response of polarized environment to rectangular current pulse: A) measurement array; B) record of current pulse (AB); C) measured voltage on MN line: A, B – current electrodes, M, N – measurement electrodes, E_P – electrical field from primary currents, E_{IP} – electrical field from secondary currents, ΔV_S – polarization voltage, ΔV_P – total voltage, I_{AB} – current strength, Δt – time of current impulse, $t_f - t_s$ – time window of measurement of polarization voltage (decay curve)

Zdolność skały do polaryzacji zależy od czasu opóźnienia momentu pomiaru pola IP w stosunku do momentu wyłączenia prądu, a także od czasu przepływu prądu (w przypadku, gdy proces generacji polaryzacji ośrodka nie osiągnął poziomu nasycenia). Zwykle czas opóźnienia to 0.5 s. W przypadku badania czasowych charakterystyk procesu polaryzacji wzbudzonej pomiary przeprowadza się dla kilku opóźnień czasowych. Czas włączenia impulsu prądowego nie powinien być zbyt długi, żeby nie obniżyć wydajności prac polowych. Zazwyczaj wynosi on od kilku sekund do około minuty.

Czasy narastania (albo zanikania) pola IP różnych skał istotnie się różnią. Największe znaczenie odgrywa przy tym obecność przewodników elektronowych – przy ich nieobecności czasy narastania (zanikania) są rzędu sekund, z ich pojawieniem czas ten może powiększać się do kilku minut, a niekiedy nawet do kilku godzin. Analizując krzywą zaniku IP, można otrzymać dodatkową informację o budowie geologicznej, w szczególności wyznaczać skład mineralny rud.

Zdolność skały do polaryzacji to parametr otrzymany w pomiarach w domenie czasu. Jego odpowiednikiem w domenie częstotliwości jest procentowy efekt częstotliwościowy (PFE).

Efekt częstotliwościowy PFE wyrażony jest wzorem

$$\text{PFE} = \frac{\sigma(\omega_1) - \sigma(\omega_0)}{\sigma(\omega_0)} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

gdzie $\sigma(\omega_1)$ i $\sigma(\omega_0)$ są wartościami przewodności mierzonymi dla częstotliwości ω_1 i ω_0 ($\omega_1 > \omega_0$).

Przy przeprowadzeniu obserwacji w domenie częstotliwości do linii AB nieprzerwanie podaje się prostokątne różnobiegunowe impulsy prądu, zmieniające się z określoną częstotliwością. Na figurze 2 pokazane są zmiany różnicy potencjałów na linii MN, odpowiadające wysokiej i niskiej częstotliwości transmitowanych impulsów prądowych. Dla niskiej częstotliwości sygnał IP osiąga większą amplitudę $V_S(\omega_0)$ niż w przypadku częstotliwości wysokiej $V_S(\omega_1)$, przy tej samej wielkości prądu w AB, kosztem dłuższego czasu ładowania.

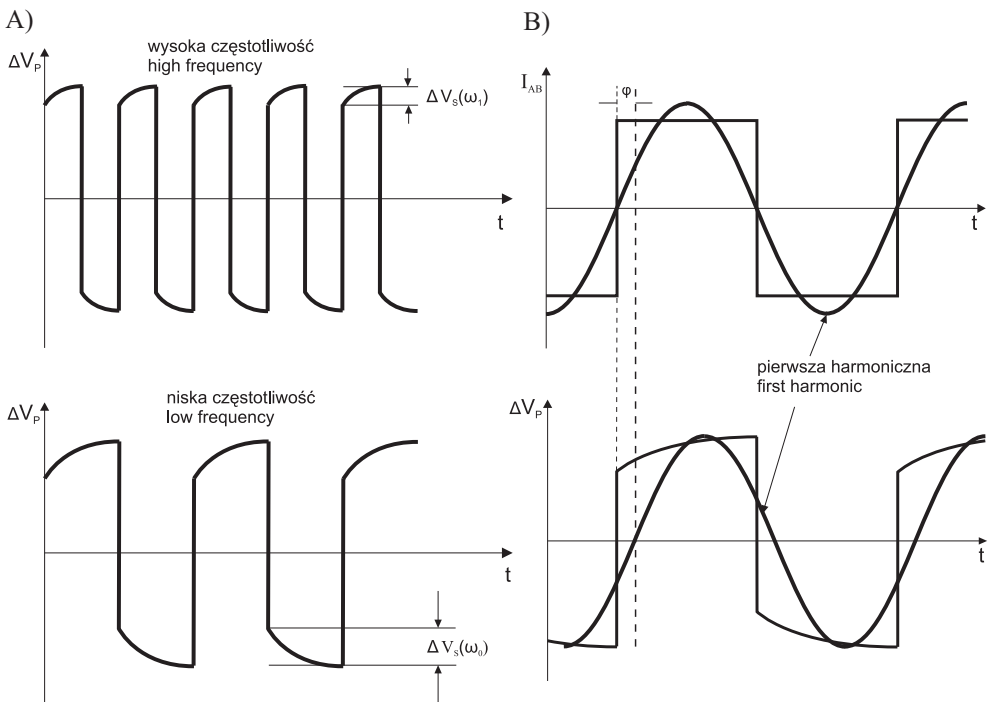


Fig. 2. Polaryzacja wzbudzona w domenie częstotliwości: A) przebiegi czasowe dla wysokiej i niskiej częstotliwości; B) przesunięcie fazowe: $\Delta V_S(\omega_0)$ – napięcie polaryzacji dla częstotliwości ω_0 , $\Delta V_S(\omega_1)$ – napięcie polaryzacji dla częstotliwości ω_1 , ΔV_P – napięcie całkowite, I_{AB} – natężenie prądu, φ – parametr fazowy

Fig. 2. Induce polarization in frequency domain: A) time series for high and low frequency; B) phase shift: $\Delta V_S(\omega_0)$ – polarization voltage for frequency ω_0 , $\Delta V_S(\omega_1)$ – polarization voltage for frequency ω_1 , ΔV_P – total voltage, I_{AB} – current strength, φ – phase parameter

W praktyce nie rejestruje się $V_S(\omega_1)$ i $V_S(\omega_0)$, lecz amplitudy głównej harmoniki $V_1(\omega_1)$ i $V_1(\omega_0)$. Na podstawie tak przeprowadzonych pomiarów można obliczyć parametr PFE według zależności

$$\text{PFE} = \frac{V_1(\omega_1) - V_1(\omega_0)}{V_1(\omega_0)} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

gdzie niską częstotliwość zazwyczaj wybiera się z interwału od 0.05 Hz do 0.5 Hz, a wysoką – od 1 Hz do 5 Hz.

Kolejny parametr, który można otrzymać, wykonując pomiary w domenie częstotliwości, to parametr fazowy φ (Fig. 2) wyrażany poprzez

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\sigma''}{\sigma'} \right) \cong \frac{\sigma''}{\sigma'} \quad (5)$$

gdzie σ'' jest urojoną składową zespolonej wartości przewodności, natomiast σ' jest jej składową rzeczywistą. Kąt fazowy w praktyce wyznacza się bezpośrednio poprzez określenie różnicy faz głównej harmoniki sygnału w układzie pomiarowym i linii prądowej (Fig. 2). Do bezpośredniego wyznaczenia parametru φ potrzebna jest synchronizacja aparatury pomiarowej i transmitera impulsów prądowych, którą uzyskuje się, wykorzystując system GPS.

Istotnym problemem przy pomiarach IP jest rozdzielanie efektów polaryzacyjnych i indukcyjnych. Podczas pomiarów w domenie czasu przy wyłączeniu prądu w ciągu pewnego czasu następuje wzbudzenie pola elektromagnetycznego w ziemi. Analogicznie, w domenie częstotliwości wartości amplitud i faz sygnału dla różnych porównywalnych wysokich częstotliwości mogą się różnić z uwagi na zjawisko indukcji elektromagnetycznej. W związku z tym w przypadku pewnych czasów opóźnień (dla pewnych częstotliwości) obserwuje się superpozycję efektów polaryzacyjnych i indukcyjnych. Istotną właściwością parametru fazowego jest to, że przy jego liczeniu jest eliminowana w znacznym stopniu składowa związana z indukcją elektromagnetyczną.

Na całkowity pomierzony sygnał w metodzie polaryzacji wzbudzonej ma wpływ kombinacja trzech typów sprzężenia: galwanicznego (efekt polaryzacji), indukcyjnego i antropogenicznego. Sprzężenie galwaniczne jest skutkiem przepływu prądu przez polaryzowalny ośrodek skalny i reprezentuje jego odpowiedź geofizyczną (efekt polaryzacji), która jest przedmiotem obserwacji w pomiarach geoelektrycznych. Niestety, informacja ta jest często zniekształcona przez indukcyjne lub elektromagnetyczne sprzężenie wywołane przez sam układ pomiarowy oraz przypowierzchniowe niejednorodności i kontakty geologiczne. Sprzężenie antropogeniczne (*cultural coupling*) może być kombinacją zarówno galwanicznego, jak i indukcyjnego sprzężenia wywołanego przez elektroenergetyczne linie transmisyjne, ogrodzenia elektryczne, rurociągi etc., które mogą przecinać profil pomiarowy lub biec do niego równolegle. Istotą przetwarzania danych IP jest zatem rozdzielenie sygnału polaryzacji wzbudzonej od składowych związanych ze sprzężeniem antropogenicznym oraz indukcyjnością elektromagnetyczną.

Indukcja elektromagnetyczna staje się poważnym problemem podczas używania wysokich częstotliwości lub krótkich czasów rejestracji zarówno w domenie częstotliwości, jak i czasu. W celu uniknięcia sprzężenia w metodzie SIP (*Spectral Induced Polarization*) używane są niższe częstotliwości rejestracji. W pomiarach metodą TDIP (*Time Domain Induced Polarization*) jedynie usunięcie fragmentu krzywej zaniku może prowadzić do usunięcia negatywnego wpływu indukcji elektromagnetycznej.

W zależności od wartości parametru polaryzowalności minerały i skały można podzielić na trzy grupy. Do pierwszej grupy charakteryzującej się bardzo wysokimi wartościami parametru polaryzowalności (6–40%) zaliczyć można rudy z przewodnością elektronową, siarczki (m.in. piryty), samorodne metale i niektóre tlenki. Drugą grupę stanowią nawodnione sypkie skały osadowe z domieszką frakcji i minerałów ilastych. Charakteryzują się one średnimi wartościami parametru polaryzowalności (2–6%). Trzecia grupa to skały o najniższych wartościach tego parametru (1–2%). W jej skład wchodzi skały osadowe nasycone zmineralizowaną wodą oraz skały wulkaniczne i metamorficzne.

Zjawisko polaryzacji wzbudzonej przebiega najintensywniej, gdy w ośrodku geologicznym występują minerały o przewodnictwie elektronowym, nie mniej jednak istnieją pewne przesłanki, które pozwalają stosować metodę IP do bezpośredniego wykrywania złóż węglowodorów (Stefaniuk 2011). Chemiczne procesy zachodzące w strefie ponad złożem węglowodorów, a związane z migracją węglowodorów ze złoża ku powierzchni ziemi, powodują powstanie w obrębie komina dyfuzyjnego strefy rozproszonej mineralizacji siarczkowej, zmieniającej głównie właściwości magnetyczne i polaryzowalność ośrodka geologicznego.

WYBRANE PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA METODY POLARYZACJI WZBUDZONEJ DO WYKRYWANIA ZŁÓŻ WĘGLOWODORÓW

Metoda polaryzacji wzbudzonej w różnych wariantach jest w ostatnich latach powszechnie stosowana do prospekcji złóż węglowodorów. Poniżej przedstawiono pięć przykładów dostępnych w publikacjach lub na stronach internetowych, które pokazują anomalie parametrów polaryzacji wzbudzonej w miejscach występowania złóż węglowodorów.

Pierwszym przykładem jest złożo ropy i gazu kulikowskie w obwodzie saratowskim. Badania wykonał dział geofizyki firmy North-West Ltd. (wg <http://www.nw-geo.ru>). Oprócz kartowania złoża i wyznaczenia miejsc nowych otworów wiertniczych wykonano również badania doświadczalno-metodyczne w celu opracowania i porównania różnych metod prac z wykorzystaniem metody polaryzacji wzbudzonej. Wykorzystano kilka rodzajów naziemnych układów pomiarowych, takich jak środkowy układ gradientowy i znormalizowany układ różnicowy. Ponadto przeprowadzono badania metodą polaryzacji wzbudzonej w wariancie otworowo-powierzchniowym. Polegają one na umieszczeniu jednej lub obu elektrod prądowych w otworze wiertniczym w pobliżu złoża, by doprowadzić do utworzenia w strefie pirytyzacji potężnych wtórnych źródeł pola polaryzacji wzbudzonej. Pomiar wykonano na powierzchni ziemi wzdłuż profili zorientowanych radialnie w stosunku do otworu wiertniczego.

Figura 3A przedstawia schemat układu w metodzie otworowo-powierzchniowej, a figura 3B schemat układu w metodzie powierzchniowej.

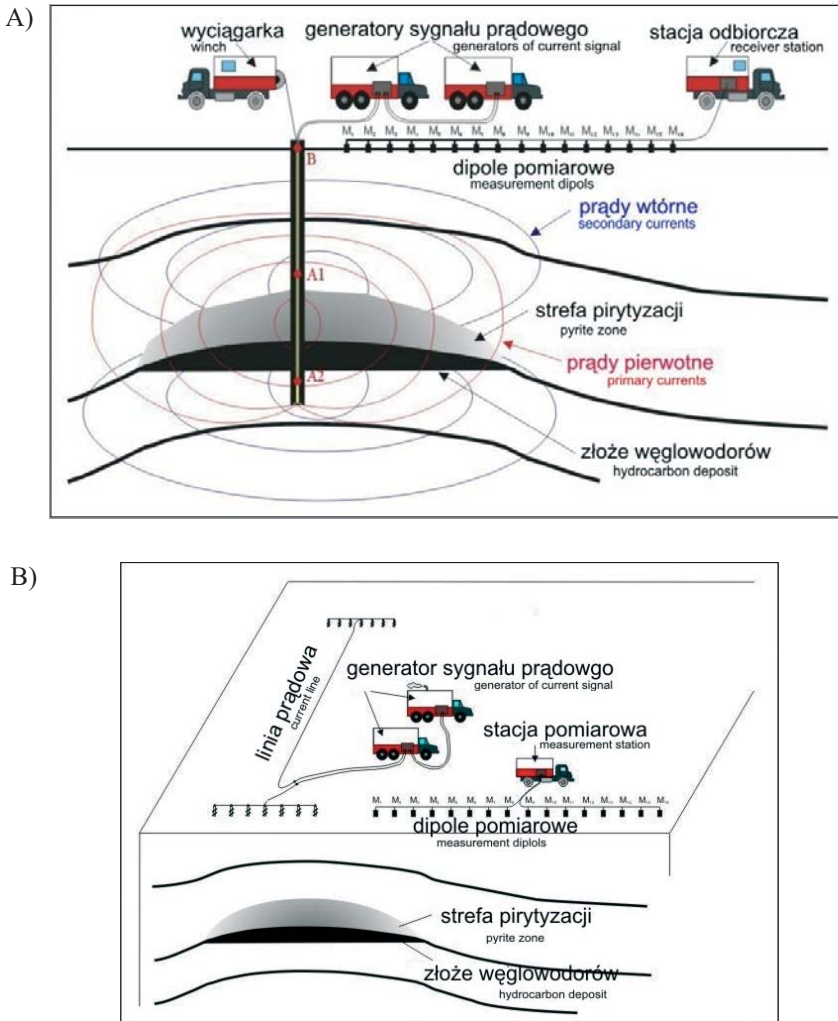


Fig. 3. Schematy układów pomiarowych stosowanych przez firmę Nord-West w metodzie powierzchniowo-otworowej (A) i powierzchniowej (B) (na podstawie <http://www.nw-geo.ru>)

Fig. 3. Scheme of arrays used by Nord-West Company for well-surface (A) and surface (B) method (acc. <http://www.nw-geo.ru>)

Figura 4 przedstawia mapę rozkładu wartości polaryzacji. W południowo-zachodniej części mapy widoczna jest silna anomalia wartości parametru IP (niebieski kolor), która związana jest z południową częścią złoża. Północnej części złoża odpowiada słaba anomalia, w zasięgu której występuje tylko jeden produktywny otwór wiertniczy.

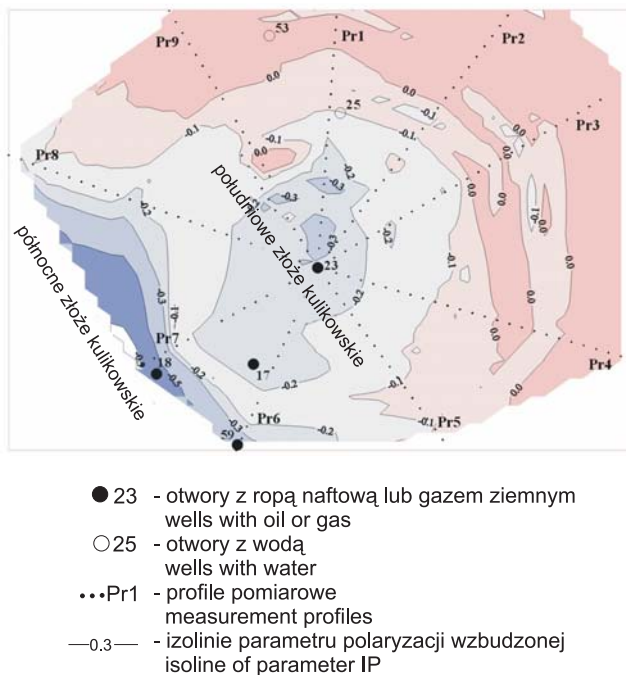


Fig. 4. Mapa anomalii polaryzacji wzbudzonej dla złoża kulikowskiego wyznaczona na podstawie badań metodą otworowo-powierzchniową (na podstawie <http://www.nw-geo.ru>)

Fig. 4. Map of induced polarization anomalies for Kulikovskie deposit made on the basis of well-surface measurements (acc. <http://www.nw-geo.ru>)

Następny przykład to region timańsko-peczorski w republice Komi. W 2006 roku firma North-West Ltd. wykonała tam powierzchniowe badania metodą polaryzacji wzbudzonej (wg <http://www.nw-geo.ru>). W rezultacie wykonanych prac wykreślono mapę anomalii polaryzacji (Fig. 5). Wyodrębnione zostały obszary anomalne parametru polaryzacji, charakteryzujące się wartościami dwukrotnie przekraczającymi poziom tła, które powiązane zostały ze strefami wtórnych zmian nad złożem węglowodorów. Otwory wywiercone w granicach anomalii dały przyrływ ropy naftowej, natomiast otwór wywiercony poza granicami anomalii okazał się nieproduktywny.

Trzeci przykład to otwór z rejonu wschodnich Chin, gdzie wykonano badania metodą polaryzacji wzbudzonej, wykorzystując dipolowy układ osiowy. W obszarze tym odkryto wiele złóż węglowodorów zarówno w pułapkach strukturalnych, jak i litologicznych. Komercyjne złoża ropy znaleziono w otworze B2 w 2004 roku na głębokości około 3500 m, po czym zaproponowano metodę SIP do określenia konturu złoża. Wykorzystano aparaturę pomiarową firmy Phoenix Geophysics Ltd. (dużej mocy transmitter T-200 – moc wyjściowa > 200 kW, prąd wyjściowy ponad 100 A, w sytuacji gdy opór uziemienia był mniejszy niż 10 Ω). Jako odbiorniki wykorzystywano moduły V8 i RXU synchronizowane z transmitters przy użyciu urządzeń GPS. Cały system pomiarowy składał się z 15 kanałów, dipol prądowy miał długość 2500 m, natomiast elektryczne dipole pomiarowe miały długości 500 m,

co zapewniało głębokość penetracji do 5000 m. Wyniki badań przedstawiono w postaci pseudoprzekroju parametru polaryzowalności, który może być uznawany za bezpośredni wskaźnik akumulacji węglowodorów (Fig. 6).

Na przekroju, w przedziale głębokości 3–4 km, widoczne jest kilka segmentów, które można utożsamiać ze wzrostem nasycenia węglowodorami (dla parametru polaryzowalności $m > 3\%$) (Zhanxiang 2005).

Kolejny przykład to produktywny otwór wiertniczy J2 znajdujący się w północnej części basenu rzeki Tarym w zachodnich Chinach. Złoże zakumulowane jest w osadach trzeciorzędowych na głębokości 4000–4500 m. Komercyjne zasoby ropy udokumentowane zostały w wielu otworach, ale też w wielu sąsiadujących otworach nie stwierdzono obecności węglowodorów. Dane sejsmiczne i wiertnicze potwierdziły, że pułapki mają charakter litologiczny. Z tego powodu zdecydowano się na wykonanie pomiarów SIP w celu określenia konturów już odnalezionych złóż, a także znalezienia potencjalnych, nowych pułapek litologicznych. Przykłady pseudoprzekrojów parametru polaryzowalności z zaznaczonymi obszarami podwyższonej koncentracji węglowodorów zestawiono w postaci przekrojów (Fig. 7) (Zhanxiang 2005).

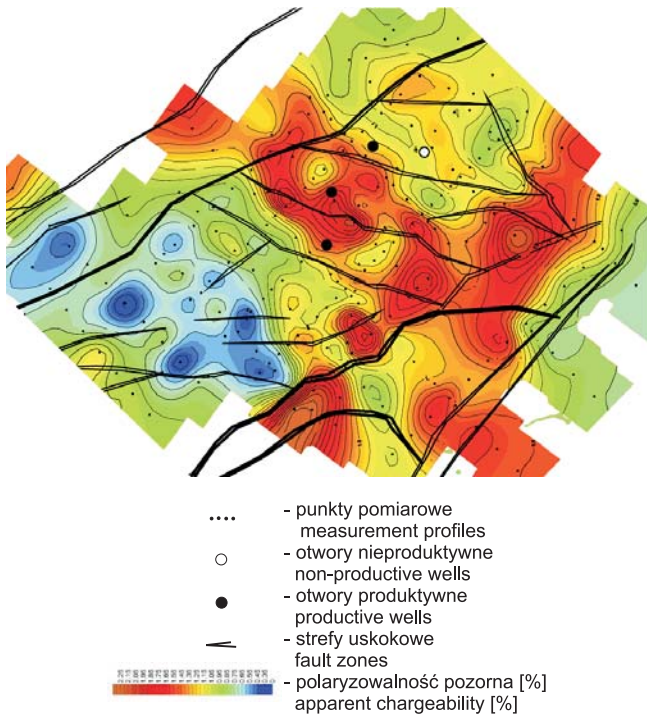


Fig. 5. Mapa anomalii polaryzacji wzbudzonej dla złoża timańsko-peczorskiego wyznaczona na podstawie badań metodą powierzchniową (na podstawie <http://www.nw-geo.ru>)

Fig. 5. Map of induced polarization anomalies for Timano-Pechorsk deposit made on the basis of results of surface measurements (acc. <http://www.nw-geo.ru>)

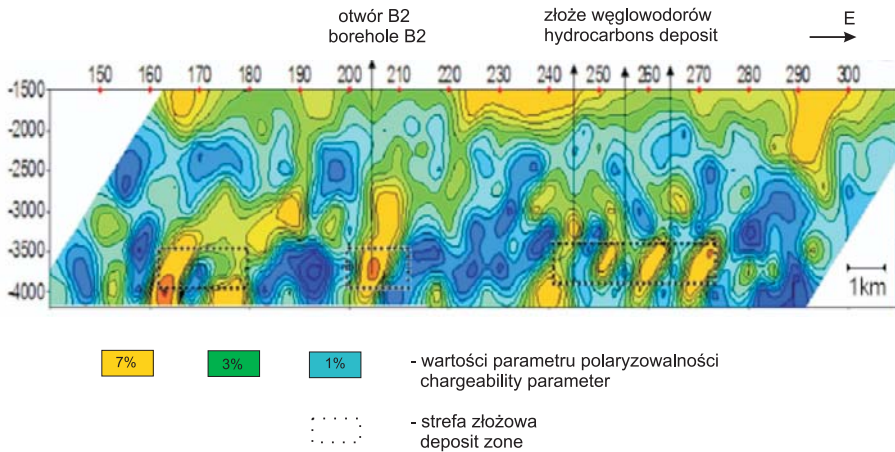


Fig. 6. Rozkład parametru polaryzowalności wzdłuż linii przecinającej otwór B2 (na podstawie Zhanxiang *et al.* 2005)

Fig. 6. Distribution of chargeability parameter along line crossing borehole B2 (acc. Zhanxiang *et al.* 2005)

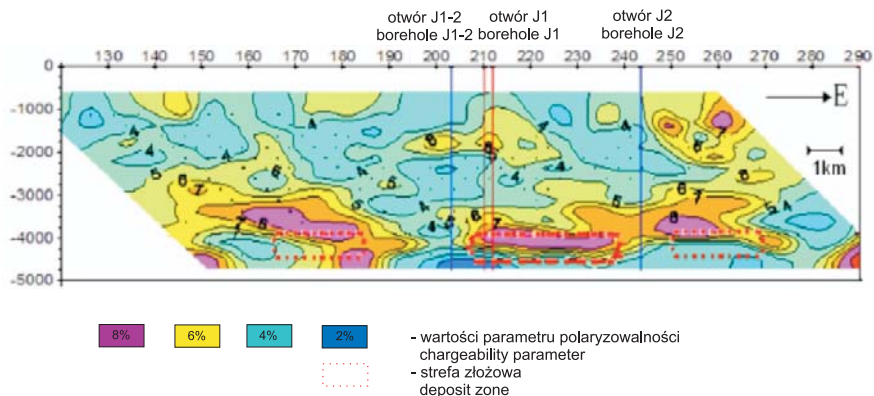


Fig. 7. Przekrój parametru polaryzowalności wzdłuż linii przecinającej otwór J2 (na podstawie Zhanxiang *et al.* 2005)

Fig. 7. Cross-section of chargeability parameter along line crossing borehole J2 (acc. Zhanxiang *et al.* 2005)

Piąty przykład to złożo ropy i gazu północnogulajewskie (Morze Barentsa, północna Rosja). Wyraźny wzrost wartości parametru polaryzowalności z 2–6% do 11–13% widoczny na przekroju na figurze 8 w przedziale głębokościowym 300–500 m jest skorelowany ze złożem węglowodorów odkrytym na większych głębokościach.

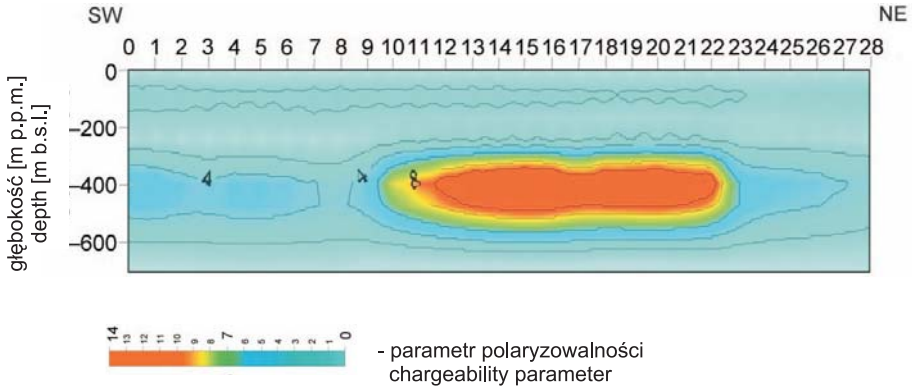


Fig. 8. Przekrój parametru polaryzowalności (Morze Barentsa, pomiary morskie) (na podstawie Veeken *et al.* 2009)

Fig. 8. Distribution of chargeability parameter (Barents Sea, off-shore) (acc. Veeken *et al.* 2009)

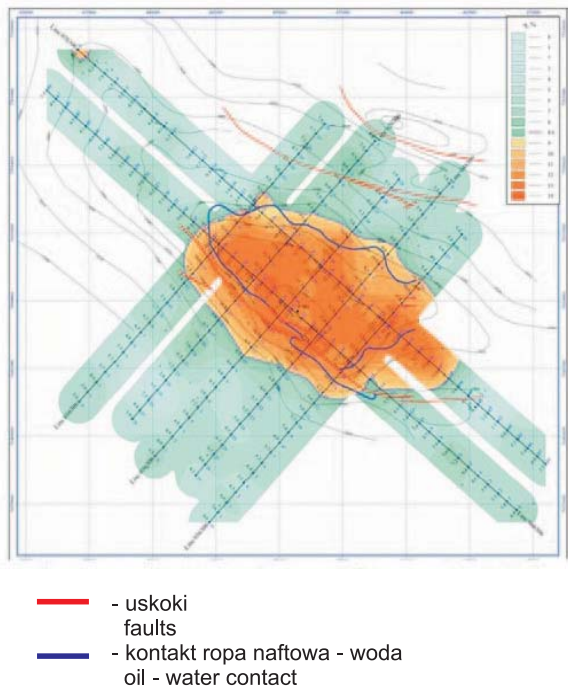


Fig. 9. Rozkład polaryzowalności (złoże północnogulajewskie, Morze Barentsa) (na podstawie Veeken *et al.* 2009)

Fig. 9. Distribution of chargeability parameter (Severo-Gulyaevskoye deposit, Barents Sea, off-shore) (acc. Veeken *et al.* 2009)

Figura 9 przedstawia mapę rozkładu parametru polaryzowalności na głębokości około 400 m. W obrębie złoża parametr polaryzowalności osiąga wartości powyżej 9%, a poza złożem oscyluje w zakresie 3–6%. Północno-wschodnie i północno-zachodnie granice anomalii dobrze korelują się z granicami złoża węglowodorów, rozbieżności nie przekraczają 1–1.5 km. Na południowo-wschodniej i południowo-zachodniej granicy anomalii parametru polaryzowalności rozbieżności sięgają 3–4 km. Być może spowodowane to jest uskoki, którymi migrują węglowodory, tworząc anomalie, lub niedokładnościami wynikającymi ze starych zdjęć sejsmicznych interpretowanych ponad 20 lat temu (Veeken *et al.* 2009).

Przytoczone powyżej przykłady wykorzystania metody polaryzacji wzbudzonej w różnych wariantach i różnych warunkach pomiarowych (lądowych i morskich), wskazują że metoda ta może dostarczyć bezpośrednich wskaźników obecności złóż węglowodorów. Źródłem anomalii mogą być wtórne strefy pirytyzacji powstałe w wyniku chemicznych procesów zachodzących w strefie przemiany związanych z migracją węglowodorów ze złoża ku powierzchni ziemi. Zatem metodę IP najefektywniej można wykorzystać do wyznaczania konturu złóż węglowodorów. Wyrazistość anomalii zależeć będzie oczywiście od stopnia nasycenia skały węglowodorami i warunków hydrogeologicznych nad złożem. W momencie gdy w porach skał zacznie dominować woda anomalia będzie zanikać. Założenie to otwiera perspektywę pomiarów IP 4D (pomiar w czasie) w rejonie eksploatowanych złóż węglowodorów.

BADANIA Z WYKORZYSTANIEM METODY POLARYZACJI WZBUDZONEJ W OBSZARZE KARPAT POLSKICH I ZAPADLIKA PRZEDKARPACKIEGO

Eksperymentalne badania metodą polaryzacji wzbudzonej na obszarze Karpat polskich i zapadlika przedkarpackiego wykonano w ramach realizacji projektu *Opracowanie nowatorskich metod wykrywania złóż węglowodorów oraz rozpoznawania struktury i zmienności złóż w trakcie ich eksploatacji za pomocą kompleksu głębokich i średniozasięgowych badań elektromagnetycznych*. Pomiarów wykonano w domenie częstotliwości (SIP) i w domenie czasu (TDIP) w rejonach złoża Rudka, Grabownica, Łodyna i Rylowa. W trakcie pomiarów rejestrowano wartości natężenia prądu w dipolu nadawczym oraz różnicy potencjałów pomiędzy elektrodami na dipolach pomiarowych. Zasady prowadzenia prac terenowych w metodzie polaryzacji wzbudzonej są podobne jak w metodach elektrooporowych oraz metodach elektromagnetycznych z kontrolowanym źródłem (CSAMT). W pomiarach został zastosowany tzw. układ ekwatorialny oraz dodatkowo w przypadku złoża Rudka – dipolowy układ osiowy (układ dipol – dipol) (Fig. 10).

Figura 10A przedstawia uogólniony schemat układu ekwatorialnego zastosowanego przy pomiarach metodą polaryzacji wzbudzonej. Metoda ta wymagała zainstalowania dwóch układów: nadawczego (prądowego) i pomiarowego (napięciowego). Układ nadawczy (prądowy) AB zbudowany był z dwóch grup elektrod stalowych umiejscowionych na linii równoległej do profilu pomiarowego. Grupy elektrod prądowych podłączone były do transmisjera TXU-30 zasilanego prądnicą trójfazową.

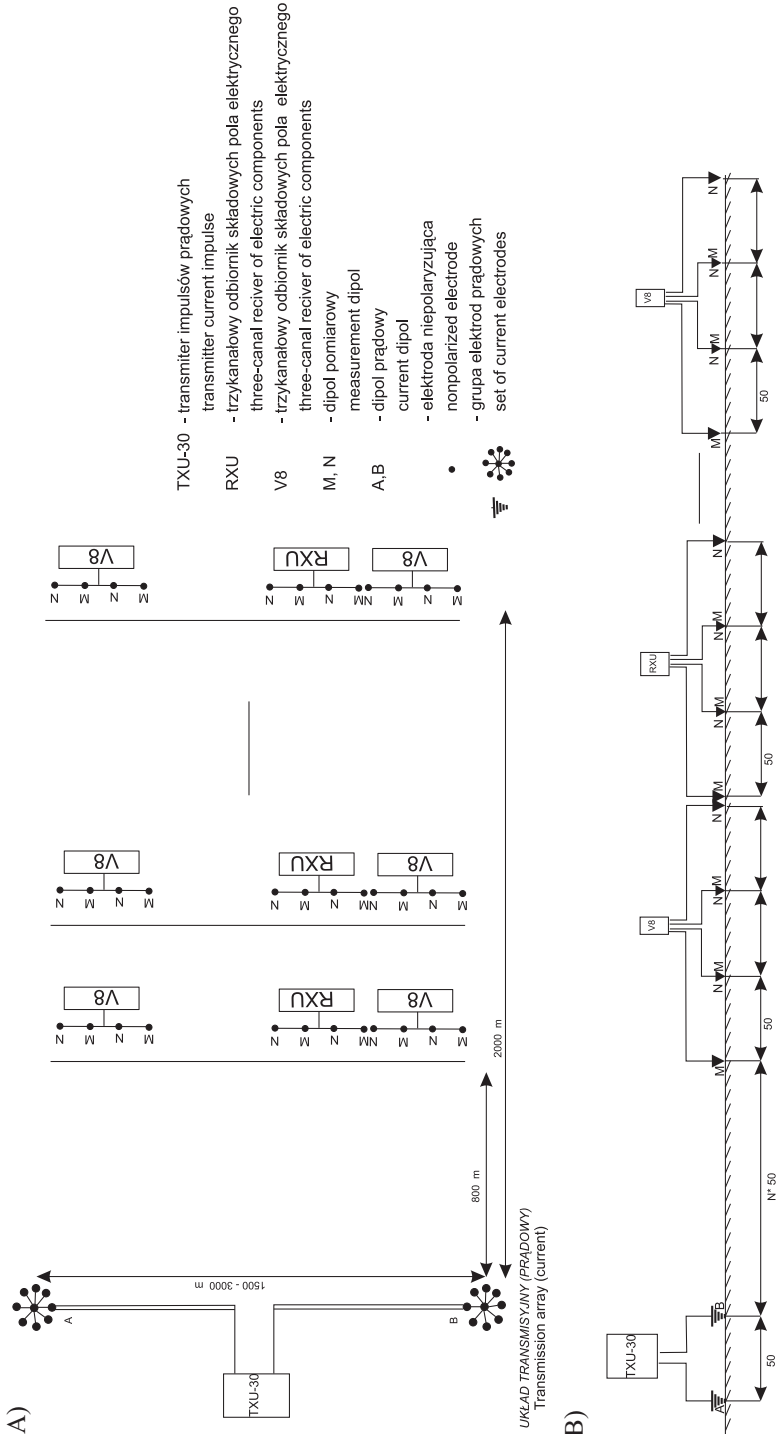


Fig. 10. Układy stosowane w metodzie polaryzacji wzbudzonej: A) układ ekwatorialny; B) dipolowy układ osiowy
Fig. 10. Arrays used in induced polarization method: A) equatorial array; B) dipole-dipole array

Do transmitera podłączony został kontroler źródła prądowego RXU-TM. Jest to jednokanałowy odbiornik, który w połączeniu z kontrolerem prądu CMU-1 służy do monitorowania oraz zapisywania na karcie pamięci typu CompactFlash wartości i kształtu prądu wychodzącego z nadajnika (transmitera TXU-30). Długość dipola prądowego była różna dla poszczególnych złóż. Wynikało to z faktu, że konieczne było zapewnienie możliwie najmniejszego oporu kontaktowego pomiędzy elektrodami a gruntem. Niskie wartości oporów kontaktowych pozwalały na przepływ większego prądu, a co za tym idzie – uzyskanie wysokiej jakości danych pomiarowych. Układ nadawczy w przypadku większości pomiarów wykonanych na obszarze Karpat polskich i zapadliska przedkarpackiego nie wymagał deinstalacji przed wykonaniem całości prac na danym złożu.

Układ pomiarowy (napięciowy) składał się z niepolaryzujących elektrod, które za pomocą kabla były podłączone do odbiorników V8-6R i RXU-3E. Pojedynczy odbiornik V8-6R lub RXU-3E rejestrował jednocześnie pomiary z trzech dipoli MN. Długość dipoli wynosiła 50 m, zatem za pomocą jednej stacji odbiorczej V8-6R lub RXU-3E wykonywano pomiary na odcinku 150 m. Po wykonaniu cyklu pomiarów metodą SIP i TDIP układ był deinstalowany i ponownie instalowany w kolejnej części profilu. Pomiary wykonywane były w systemie ciągłym, tzn. ostatnia elektroda jednego z odbiorników była pierwszą elektrodą kolejnego odbiornika. Synchronizacja sygnału pomiędzy układem prądowym i pomiarowym odbywała się za pomocą urządzeń GPS.

Zasięg głębokościowy w metodzie polaryzacji wzbudzonej jest ściśle związany z konfiguracją układu pomiarowego. Jest mianowicie zależny od wielkości dipola pomiarowego (MN) oraz dipola prądowego, jak również odległości pomiędzy nimi i rozkładu oporności w ośrodku geologicznym. Położenie względem siebie dipoli nadawczych i profili pomiarowych oraz długości dipoli nadawczych dla poszczególnych złóż przedstawia figura 11.

Strefy mineralizacji siarczkowej w obrębie komina dyfuzyjnego w zależności od warunków hydrogeologicznych i występowania regionalnych uszczelnień mogą się tworzyć od 1 m do nawet kilku kilometrów powyżej złoża węglowodorów. Zatem największe odległości dipol nadawczy – dipol odbiorczy zastosowano tam, gdzie złoża zalegały najgłębiej (Ryłowa, Grabownica), mniejsze w przypadku złóż Rudka i Łodyna. Ustalono odległość dipol nadawczy – dipol odbiorczy na dwukrotnie większą niż głębokość zalegania złoża.

Schemat dipolowego układu osiowego zastosowanego w metodzie polaryzacji wzbudzonej na złożu Rudka zilustrowano na figurze 10B. Wszystkie elementy składowe aparatury geoelektrycznej system200.net wykorzystane w układzie ekwatorialnym znalazły zastosowanie także w układzie dipol – dipol. Różnica dotyczy w konfiguracji i sposobu wykonywania pomiarów. Dipol nadawczy i odbiorczy ustawione były względem siebie w linii, a ich długość była taka sama i wynosiła 50 m. Dipol prądowy ze względu na częste zmiany jego położenia uziemiany był jedynie za pomocą pary elektrod stalowych, dipole pomiarowe uziemiane były natomiast za pomocą elektrod niepolaryzujących. Po wykonaniu cyklu pomiarowego obejmującego pomiary metodą SIP i TDIP zarówno układ nadawczy, jak i układ odbiorczy był deinstalowany i przesuwany wzdłuż profilu o pewien krok. Czynność ta była wykonywana, dopóki nie osiągnięto końca zaprojektowanego profilu.

Na podstawie odległości pomiędzy dipolem nadawczym i pierwszym dipolem odbiorczym można oszacować minimalny zasięg głębokościowy, tzn. głębokość, od jakiej rozpoczyna się badanie ośrodka geologicznego.

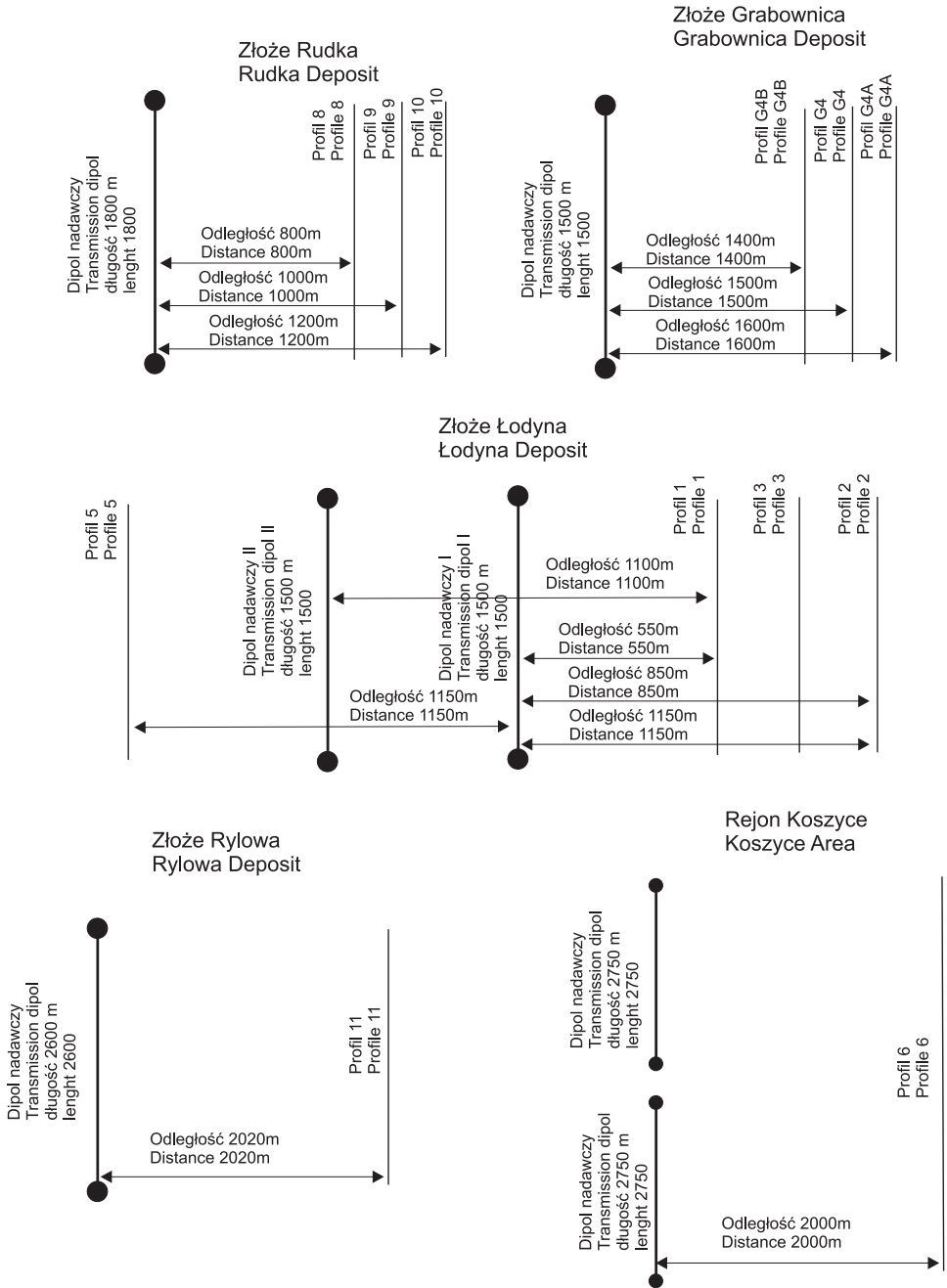


Fig. 11. Położenie dipoli nadawczych i profili pomiarowych oraz długości dipoli nadawczych

Fig. 11. Orientation of transmission dipoles and measurement profiles and length of transmission dipoles

Na podstawie odległości pomiędzy dipolem nadawczym i ostatnim dipolem odbiorczym można natomiast oszacować maksymalny zasięg głębokościowy metody. Wynika z tego, że użycie dużej liczby odbiorników lub zastosowanie dłuższego dipola zwiększa zasięg głębokościowy. Należy jednak postępować rozważnie, ponieważ może się zdarzyć, że transmitowane prądy będą niskie, a stosunek sygnał/szum na ostatnich dipolach pomiarowych mały, co spowoduje niską jakość danych pomiarowych lub ich brak. Na złożu Rudka dla jednego położenia dipola prądowego rejestrowano jednocześnie sygnał na dziewięciu dipolach pomiarowych. Sygnał na trzech pierwszych dipolach pomiarowych charakteryzował się wysoką jakością danych, na kolejnych trzech jakością średnią, a pomiary wykonane na ostatnich trzech dipolach nie nadawały się do analizy.

Interpretacja danych pomiarowych za pomocą układu ekwatorialnego ma charakter jakościowy. Wyniki pomiarów przedstawiane są w postaci map rozkładu parametrów polaryzacji wzbudzonej na głębokości określonej w przybliżeniu na podstawie geometrii układu lub w postaci wykresów wzdłuż profili. Na tej podstawie wydzielić można strefy anomalne w stosunku do otaczającego tła. W przypadku zastosowania dipolowego układu osiowego możliwe jest przeprowadzenie procesu inwersji parametrów polaryzacji i oporności, a następnie przedstawienie tych wyników w postaci przekrojów i wykonanie interpretacji ilościowej.

Złoże Rajsko-Rylowa

Testowe badania metodą polaryzacji wzbudzonej z zastosowaniem układu ekwatorialnego w strefie gazu ziemnego Rylowa (zapadlisko przedkarpackie) wykonano wzdłuż profilu pomiarowego o długości około 3500 m. Dodatkowo wzdłuż tego profilu wykonano badania metodą CSAMT. Odległość $T_x - R_x$ wynosiła 2020 m.

Wyniki przetwarzania danych w postaci wartości kąta fazowego zestawione z wynikami inwersji 2D danych CSAMT przedstawiono na figurze 12. Dane otworowe wskazują na obecność węglowodorów w piaskowcach cenomanu w otworze Rylowa-5, natomiast jako otwór suchy traktuje się otwór Niedzieliska-1 (w południowej części profilu). Wyniki te doskonale korespondują z pomiarami polaryzacji wzbudzonej, gdzie dużą, wyróżniającą się z tła anomalię fazową zarejestrowano w rejonie otworu Rylowa-5. Ślady zgazowania płuczki stwierdzono także w otworze Górka-5, który znajduje się na skraju anomalii polaryzacji wzbudzonej. Na uwagę zasługuje dodatkowo fakt, że anomalia polaryzacji jest gwałtownie obcięta zarówno od strony południowej, jak i północnej. Wiąże się to prawdopodobnie z systemem równoległych uskoku, które ograniczają złożę węglowodorów. Obcięcie uskoku od strony południowej jest dodatkowo potwierdzone na przekroju geoelektrycznym, gdzie widać gwałtowną zmianę w rozkładzie oporności podłoża podkredowego (węglanów górnej jury) (Stefaniuk *et al.* 2010).

Złoże Rudka

Złoże gazu ziemnego Rudka rozpościera się w północno-wschodniej części zapadliska przedkarpackiego ponad zrębem Ryszkowej Woli. Jest to wielohoryzontowe złożę gazu ziemnego zakumulowane w piaskowcowo-mułowcowych poziomach dolnego sarmatu, którego miąższości efektywne horyzontów wahają się od 2 m do 13 m.

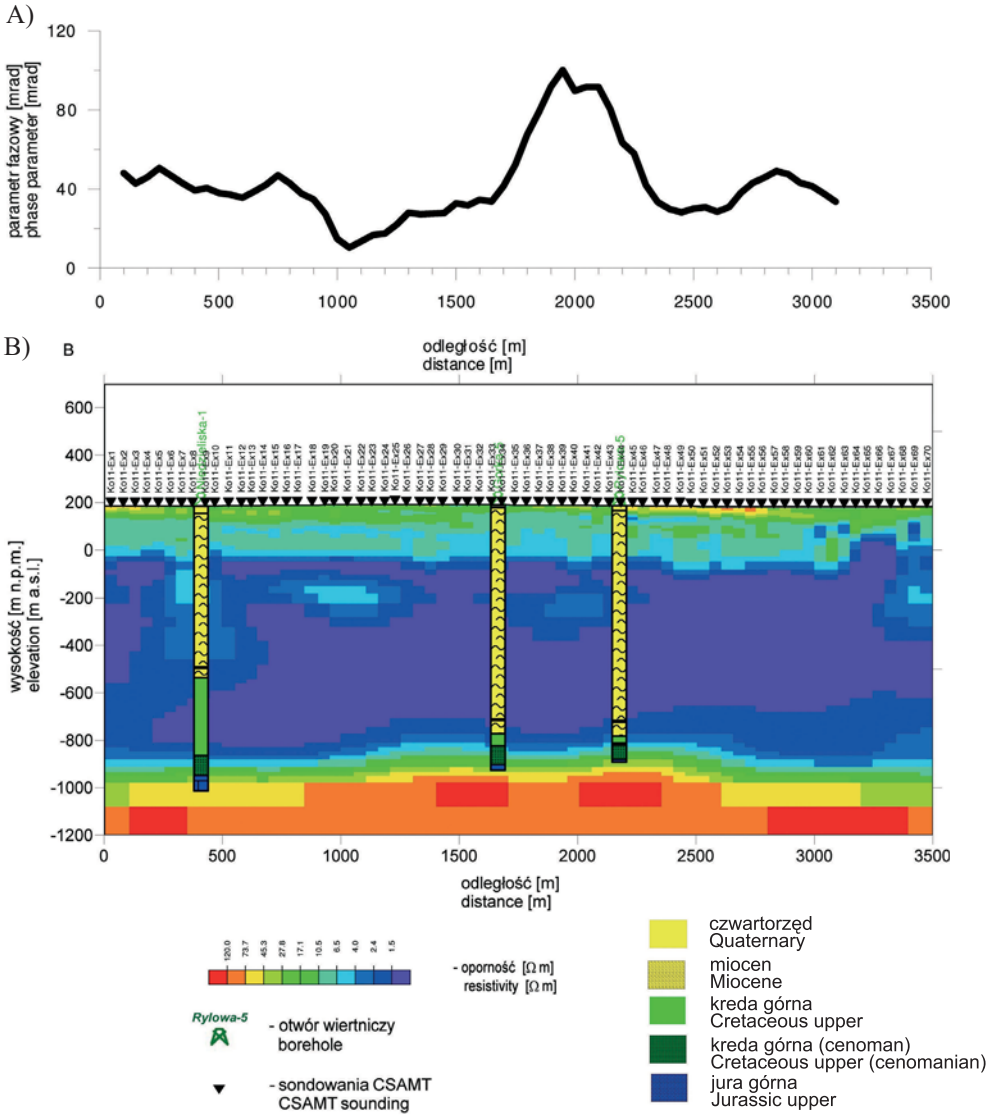


Fig. 12. Wykres parametru fazowego polaryzacji wzbudzonej (A) i przekrój geoelektryczny obliczony na podstawie wyników inwersji 2D krzywych sondowań CSAMT (B) wzdłuż profilu 11-Kosz-09-IT

Fig. 12. Plot of phase parameter of induced polarization (A) and geoelectrical cross-section based on 2D inversion of CSAMT data (B) along profile 11-Kosz-09-IT

Figura 13 przedstawia mapę rozkładu parametru fazowego polaryzacji wzbudzonej na tle mapy strukturalnej i horyzontu gazonośnego złoża Rudka (zapadlisko przedkarpackie). Pomiaru wykonano metodą SIP, stosując układ ekwatorialny. Do obliczeń parametru fazowego wybrano częstotliwości 0.031 Hz, 0.0208 Hz i 0.0156 Hz, uzyskane wyniki zostały

uśrednione, a następnie posłużyły one do konstrukcji mapy rozkładu tego parametru w południowo-wschodniej części złoża Rudka. Obliczenia przeprowadzono przy niskich częstotliwościach z powodu potrzeby ograniczenia wpływu sprzężenia elektromagnetycznego. Najwyższe wartości parametru fazowego występują na południowy zachód od otworu Rudka-10 i „opierają się” o południową strefę uskoku. Wyniki uzyskane na podstawie danych polaryzacji wzbudzonej wskazują więc, że ten obszar jest najbardziej perspektywiczny pod względem występowania węglowodorów. Podwyższone wartości parametru fazowego występują także w otoczeniu północnej strefy uskoku, zatem ich geneza może mieć związek z akumulacją węglowodorów w strefie przyuskokowej. Najniższe wartości występują na południowy zachód od południowej strefy uskoku oraz na południowy wschód od otworu Rudka-10.

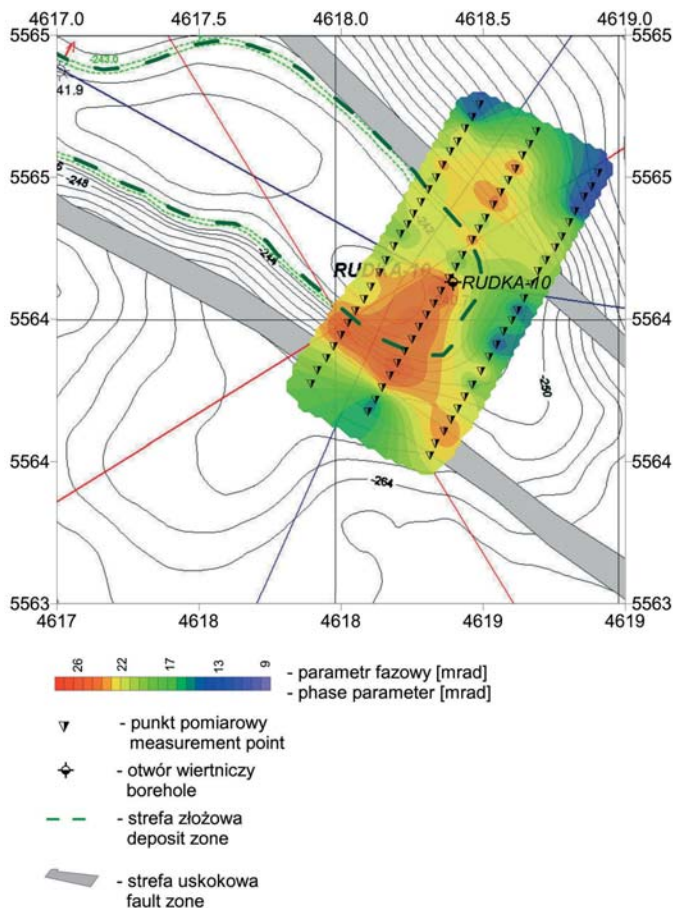


Fig. 13. Rozkład wartości parametru fazowego polaryzacji wzbudzonej na tle mapy strukturalnej horyzontu sejsmicznego, złoża Rudka

Fig. 13. Distribution of phase parameter of induced polarization against the background of structural map of seismic horizon, Rudka deposit

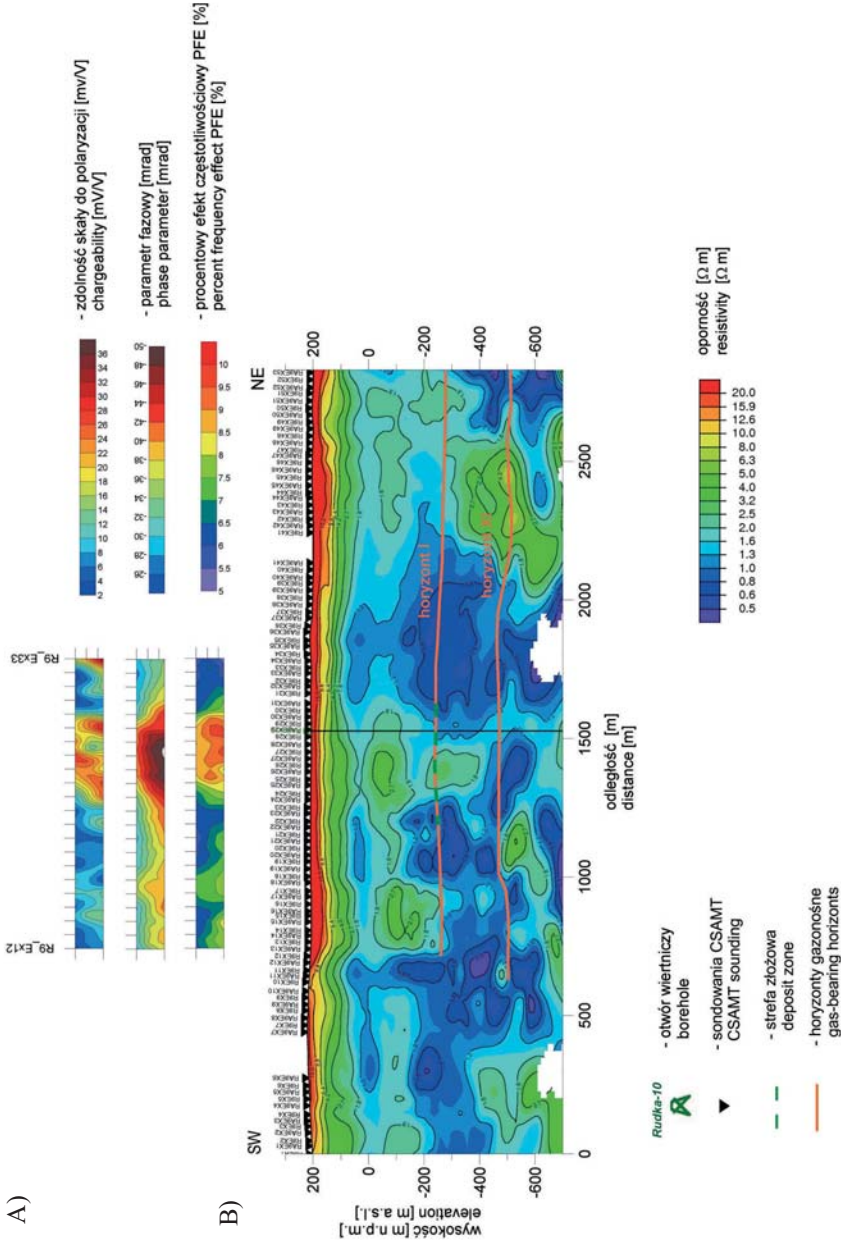


Fig. 14. Rozkład wartości parametrów polaryzacji wzbudzonej (A) i przekrój geoelektryczny skonstruowany na podstawie wyników inwersji 1D krzywych sondowań CSAMT (B) wzdłuż profilu 09-R-10

Fig. 14. Distribution of induced polarization parameters (A) and geoelectrical cross-section according to 1D inversion of CSAMT data (B) along profile 09-R-cs-09

Strefa na południowy zachód od otworu Rudka-10 zaznaczyła się jako perspektywiczna również w badaniach metodą polaryzacji wzbudzonej wykonanych za pomocą dipolowego układu osiowego.

Figura 14 przedstawia rozkład oporności wzdłuż profilu 09-R-Cs-09 oraz rozkład wartości trzech parametrów polaryzacji wzbudzonej: zdolności skały do polaryzacji (na podstawie pomiarów w domenie czasu TDIP), parametru fazowego i procentowego efektu częstotliwościowego (na podstawie pomiarów w domenie częstotliwości SIP). Pomiary metodą polaryzacji wzbudzonej wykonane zostały w centralnej, najbardziej perspektywicznej części profilu 09-R-Cs-09. Rozkład oporności uzyskano na podstawie wyników inwersji 1D krzywych sondowań metodą Occama.

Do konstrukcji pseudoprzekroju parametru fazowego wybrano częstotliwości 0.125 Hz, natomiast procentowy efekt częstotliwościowy obliczony został dla częstotliwości wysokiej $\omega_1 = 1$ Hz i częstotliwości bazowej $\omega_2 = 0.125$ Hz. Pomiędzy 1300. a 1600. metrem profilu zaobserwowano anomalie wszystkich parametrów polaryzacji wzbudzonej. Stwierdzono trzykrotny wzrost zdolności skały do polaryzacji oraz dwukrotny wzrost procentowego efektu częstotliwościowego i parametru fazowego w stosunku do otoczenia. Anomalie parametrów IP korelują się także ze strefą o podwyższonej dwukrotnie w stosunku do otoczenia oporności na głębokości 200–400 m p.p.m. Strefa ta wiązana jest z występowaniem w tym rejonie horyzontów gazonośnych. Podwyższenie wartości parametrów IP można zauważyć także między 800. a 1000. metrem i są one również skorelowane ze strefą o podwyższonej oporności. Jednak anomalie te nieznacznie przekraczają poziom tła (Stefaniuk *et al.* 2010a).

Złoże Grabownica

Złoże ropy i gazu Grabownica występuje w obrębie długiego, stromego fałdu przeciętego szeregiem stref tektonicznych zarówno zgodnych z jego rozciągłością jak też do niej prostopadłych. Serię złożową tworzą stosunkowo cienkie i stromo zapadające warstwy piaskowcowe uszczelnione przez warstwy łupkowe. W części obszaru złożowego uszczelnienie wydaje się problematyczne ze względu na bezpośredni kontakt stromo zapadających warstw z powierzchnią.

Figura 15 przedstawia mapę parametru fazowego polaryzacji wzbudzonej na tle mapy geologicznej złoża Grabownica. Pomiary wykonano metodą SIP, stosując układ ekwatorialny. Podobnie jak w przypadku złoża Rudka do konstrukcji mapy wykorzystano uśrednione wartości parametru fazowego obliczone przy częstotliwości 0.031 Hz, 0.0208 Hz i 0.0156 Hz. Analiza uzyskanej mapy pozwala wysunąć tezę, że w przypadku złoża Grabownica parametr fazowy pozwala na stosunkowo dokładne określenie konturu złoża. Ponadto już w obrębie samego złoża, analizując jego wartości, można wskazać miejsca najlepsze do wykonania wierceń poszukiwawczych. Najwyższe wartości parametru fazowego występują na południowy zachód od otworu HB-6, na południe i wschód od otworu Władysław oraz w rejonie otworu HB-7, w którym w interwale głębokościowym 500–600 m występowały horyzonty z przyływami gazu. W rejonie otworu HB-6, który okazał się nieproduktywny, zanotowano obniżone wartości parametru fazowego (Stefaniuk *et al.* 2010b).

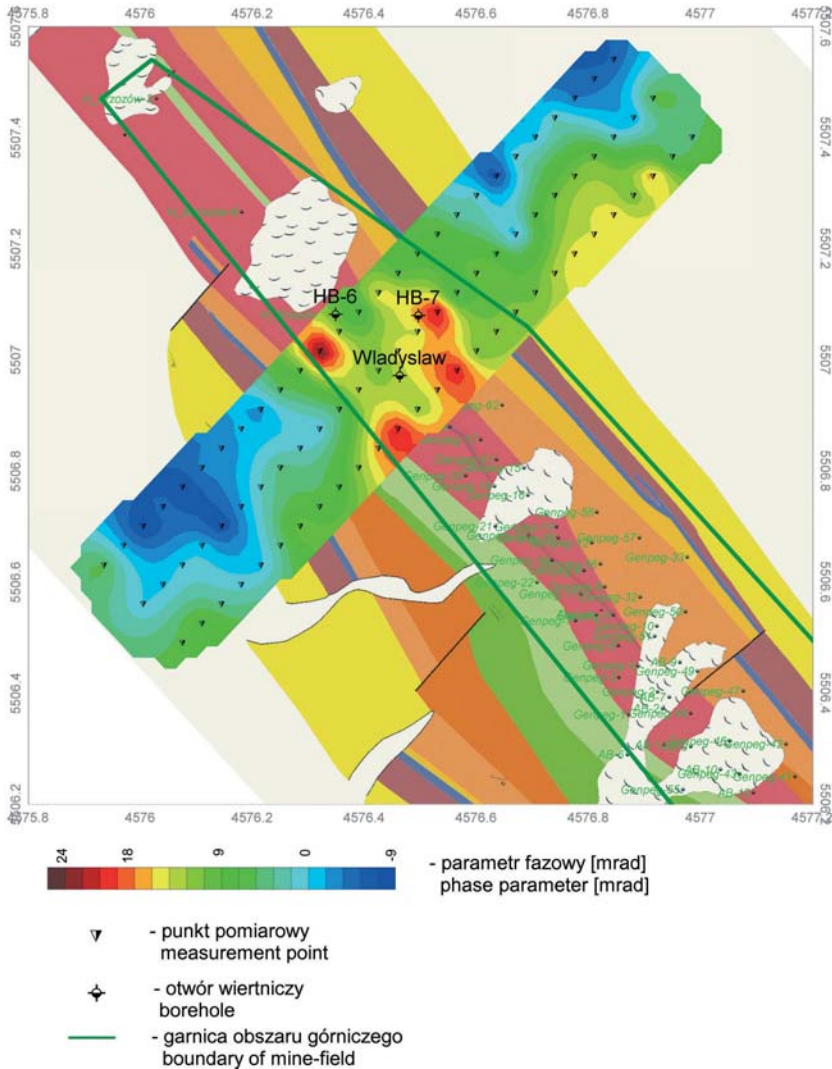


Fig. 15. Rozkład wartości parametru fazowego polaryzacji wzbudzonej na tle powierzchniowej mapy geologicznej

Fig. 15. Distribution of phase parameters of induced polarization against the background of surface geological map

Analiza parametrów polaryzacji wzbudzonej dostarcza informacji jakościowych o występowaniu węglowodorów na badanym obszarze. Na podstawie intensywności anomalii parametrów polaryzacji wzbudzonej nie można szacować głębokości zalegania złoża. Istotne zatem wydaje się wykonywanie pomiarów IP w kompleksie z innymi metodami geofizycznymi, np. CSAMT, sejsmika refleksyjna etc.

PODSUMOWANIE

Metoda polaryzacji wzbudzonej w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat stosowania ugruntowała swoją pozycję wśród metod geoelektrycznych. Dzięki rozwojowi nowoczesnych technik informatycznych oraz technologii GPS wdrażane są nowe warianty metody, które w czasie tworzenia jej podstaw teoretycznych nie mogły być z przyczyn technologicznych stosowane. Rozwój techniki pomiarowej i przetwarzania danych spowodował, że problem sprzężenia elektromagnetycznego jest minimalizowany zarówno na etapie akwizycji, jak i przetwarzania danych. Dodatkowo możliwość pomiaru parametrów polaryzacji dla dużych offsetów, tj. dużych odległości $Tx - Rx$, spowodowała, że oprócz dotychczasowych zastosowań w poszukiwaniach minerałów rudnych metody IP stosuje się w prospekcji węglowodorów. Parametry polaryzacji są obecnie jednym ze wskaźników występowania węglowodorów.

Zastosowanie metody polaryzacji wzbudzonej do bezpośredniego wykrywania złóż węglowodorów w ramach prac objętych „Inicjatywą Technologiczną I” było pierwszym tego typu przedsięwzięciem wykonywanym w Polsce przez krajowe firmy geofizyczne (PBG) i placówki naukowe (AGH). Przedstawione przykłady wykorzystania metod IP do wykrywania (lub uszczegółowienia już znanych) złóż węglowodorów na świecie potwierdzają ich przydatność, jednakże nieznaną jest jeszcze faktyczna efektywność takiego rozwiązania metodycznego stosowanego do badania złóż ropy i gazu w Polsce (brak jest otworów wiertniczych wykonanych po pracach geoelektrycznych metodą IP). Przedstawiono przesłanki, świadczące o tym, iż w przypadku stosunkowo płytkiego zalegania złóż węglowodorów metoda IP może znaleźć zastosowanie do okonturowania złoża zarówno będącego w trakcie rozpoznania, jak i eksploatacji. Należy tu jednak wykorzystywać metody polaryzacji wzbudzonej w połączeniu z innymi metodami geoelektrycznymi (np. CSAMT, sejsmika). Konieczność ta spowodowana jest faktem, że wyniki interpretacji pomiarów IP w zasadzie nie dają informacji o strukturze złoża, jedynie o jego istnieniu i parametrach (dokładnie – rodzaju medium nasycającego pory skały). Dlatego w przypadku małych, płytko zalegających złóż w skomplikowanym geologicznie ośrodku metoda polaryzacji wzbudzonej może dostarczać informacji geofizycznych bardzo wysokiej jakości. Należy się jednak liczyć z ewentualnymi, praktycznymi ograniczeniami stosowania metody IP w obszarach wysoce zurbanizowanych (a takimi właśnie są obszary obecnie eksploatowanych złóż węglowodorów). Wykonanie odpowiednio gęstego zestawu ciągłych profili w obszarze eksploatowanych obecnie złóż jest zatem przedsięwzięciem skomplikowanym i wymagać będzie z pewnością wielu modyfikacji dotychczas znanych i opisanych w opracowaniu zaleceń metodycznych w wykonywaniu pomiarów metodą polaryzacji wzbudzonej.

W artykule wykorzystane zostały wyniki prac zrealizowanych przez Akademię Górniczo-Hutniczą im. St. Staszica w Krakowie w ramach projektu naukowo-badawczego nr 1302 pt. „Opracowanie nowatorskich metod wykrywania złóż węglowodorów oraz rozpoznawania struktury i zmienności złóż w trakcie ich eksploatacji za pomocą kompleksu głębokich i średniozasięgowych badań elektromagnetycznych” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

- Bleil D.F., 1953. Induced polarization: a method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18, 636–661.
- Brown R.J., 1985. EM coupling in multi-frequency IP and a generalization of Cole-Cole impedance model. *Geophysical Prospecting*, 33, 282–302.
- Dias C.A., 2000. Developments in model to describe low frequency electrical polarization of rocks. *Geophysics*, 65, 282–302
- Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R. & Nelson P.H., 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 43, 588–609
- Stefaniuk M., Maj E., Sito Ł., Słyś M. & Wojdyła M., 2010. Anomalie elektromagnetyczne związane z akumulacjami węglowodorów na przykładzie wybranych złóż karpaccich i zapadliska przedkarpacciego. *III Konferencja Naukowo-Techniczna „Ropa i gaz – złoża konwencjonalne i niekonwencjonalne”, Czarna 11–14 kwietnia 2010*, 53–54.
- Stefaniuk M., Wojdyła M., Figuła J. & Sito Ł., 2010a. Strefa złożowa Rudka w interpretacji danych elektromagnetycznych. *Materiały seminaryjne pod redakcją dra hab. inż. Michała Stefaniuka, Iwkowa 2010*.
- Stefaniuk M., Wojdyła M., Maj E., Sito Ł. & Słyś M., 2010b. Interpretacja danych elektromagnetycznych w środkowej i północno-zachodniej części złoża ropy naftowej i gazu ziemnego „Grabownica”. *Materiały seminaryjne pod redakcją dra hab. inż. Michała Stefaniuka, Iwkowa 2010*.
- Stefaniuk M., 2011., Metody elektromagnetyczne w prospekcji naftowej. *Geologia* (kwartalnik AGH), 37, 1, 5–38.
- Sunde E.D., 1967. *Earth conduction effects in transmission systems*. New York, Dover.
- Veeken P.C.H., Legeydo P.J., Davidenko Y.A., Kudryavceva E.O., Ivanov S.A. & Chuvaev A., 2009. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration. *Geophysics*, 74, 2, B47–B59.
- Ward S.H., Stemberg B.K., LaBrecque D.J. & Poulton M.M., 1995. Recommendations for IP research. *The Leading Edge*, April 1995, 243–247.
- Ward S.H., 1990. Resistivity and induced polarization methods. W: Ward S.H., *Geotechnical and environmental geophysics, I, Review and Tutorial*, Soc. Explor. Geophys., 147–190.
- Zhanxiang He, Wenbo Jiang, Pingsheng Liu CuiXianwen, 2005. Hydrocarbon Detection with High-Power Spectral Induced Polarization, Two Cases. *Extended Abstract. EAGE 67th Conference and Exhibition, Madrid, Spain, 13–16 June*, P192.
- <http://www.nw-geo.ru>

Summary

Geological objects that have been polarized due to an electric current pulse generate electric current, which decays with time but can be measured at the ground surface when the inducing current is off. Because the amplitude and decay time of generated signals of electric field polarization depend on geological build-up and mineral composition of the

objects and geology of the environment, hence measurement and analysis of such signals provided information on the geological structure.

The generation of induced polarization effect can be illustrated with a case study of an ore body over which a 4-electrode array AMNB is laid out (Fig. 1A). Electric current is passed through current electrodes AB over a time interval wt (Fig. 1B). A potential difference measured at potential electrodes MN corresponds to a joined effect of primary currents (E_p) at AB and secondary currents E_{IP} (Fig. 1C). When steady-state current flowing in a rock medium is abruptly cut off, the potential difference ΔV_p between two grounded electrodes drops sharply to so-called polarization voltage ΔV_s and then decays asymptotically to zero.

A measure of geological medium's capability to be polarized is a so-called polarization parameter (chargeability), M , which is determined by measuring the potential difference V_p during the current flow and then the potential difference V_s at some moment after the current had been cut off. Chargeability depends on the delay time between IP field measurement and current cut off as well as on current flow time. To study time characteristics of the induced polarization, measurements are carried out for several time delays. Rise time (or decay time) of IP field is different for different rocks. Of most importance is presence of electronic conductors – their absence results in rise time (or decay time) on the order of seconds while with their presence the time increases to several minutes or even a few hours.

Chargeability is a parameter measured in the time domain. Its equivalent in the frequency domain is percent frequency effect (PFE). In the time-domain measurements, rectangular bipolar pulses that vary with a given frequency are continuously transmitted. Figure 2 shows the potential difference at MN that corresponds to high and low frequency of transmitted current pulses. At low frequency, the amplitude of IP signal $V_S(\omega_0)$ is higher than $V_S(\omega_1)$ for high frequency, at the same current in AB at the expense of longer loading time. In practice, harmonics of $V_1(\omega_1)$ i $V_1(\omega_0)$ are recorded rather than $V_S(\omega_1)$ and $V_S(\omega_0)$. A phase parameter, ϕ , is another parameter that can be measured in the frequency domain. The phase angle is determined directly from the phase difference of the main signal harmonics in the measurement array and current line (Fig. 2).

The induced polarization is most intensive when minerals with electronic conductance occur in a rock medium; however there appear some circumstances to apply the induced polarization method into direct hydrocarbon prospecting. As a result of chemical processes that take place over a hydrocarbon deposit and are associated with hydrocarbons migrating from the deposit to the ground surface, there arise a diffusion chimney of dispersed sulfide mineralization zone that alters magnetic properties and chargeability of a geological medium.

Over the last years, the induced polarization method has been widely applied into hydrocarbon prospecting worldwide. We present five examples of anomalies of induced polarization parameters observed for hydrocarbon occurrence sites.

First, a case study of the Kulikovskie oil and gas deposit (Saratov District, Russia) has been discussed. Measurements were taken at the ground surface along measurement lines arranged radially to the borehole (Fig. 3). A strong anomaly related with the southern part of the deposit can be seen in a map of polarization parameter distribution. A weak anomaly corresponds to a northern part of the deposit where there is only one producing well (Fig. 4).

Next, an example of surface induced polarization investigations carried out in 2006 in the Timano-Pechorsk region in the Komi Republic is given. The resulting map shows anomalous zones of polarization parameter with its values exceeding twice the background level, which were related to secondary changes over the deposit (Fig. 5).

A third example is from eastern China, where IP investigations employed a dipole-dipole array. Results are shown as a pseudo cross-section of chargeability (Fig. 6).

A next case study refers to northern part of the Tarim Basin in western China. Pseudo cross-sections of chargeability, with marked zones of increased hydrocarbon concentration are shown in figure 7.

The last example is Severo-Gulyaevskoye oil and gas deposit (Barents Sea). An evident increase of chargeability from 2–6% to 11–13% can be seen for a depth range of 300–500 m; it correlates with a hydrocarbon deposit discovered at greater depth (Fig. 8). Map of chargeability distribution was computed at the depth of about 400 m (Fig. 9). The chargeability value exceeds 9% within a deposit while it ranges from 3% to 6% outside the deposit.

Field technique for induced polarization measurements is similar to that for resistivity method. A so-called equatorial array (Fig. 10A) and, additionally, a dipole-dipole array for the Rudka deposit were applied (Fig. 10B). The penetration depth of the IP method is closely connected with the configuration of a measurement array (Fig. 11).

Induced polarization test measurements with the use of an equatorial array were made for an oil deposit zone. Results of data processing in the form of phase angle values are shown in figure 12 together with 2D inversion of CSAMT data. Borehole data point to hydrocarbons in Cenomanian sandstones in the Ryłowa-5 well while the Niedzieliska-1 well is considered to be a dry well. The results perfectly correspond with IP measurements: a strong anomaly has been recorded in vicinity of the Ryłowa-5 well.

Figure 13 shows a distribution of phase parameter of induced polarization against the background of the structural map of gas-bearing horizon of the Rudka deposit. The highest values of phase parameter are observed south-west of Rudka-10 well. Increased values of phase parameter can be also seen in the surrounding of northern fault zones, thus their origin could be associated with hydrocarbon accumulation in the near-fault zone. Figure 14 presents the resistivity distribution along profile 09-R-Cs-09 and values for three induced polarization parameters: chargeability, phase parameter, and PFE. Anomalies of all IP parameters have been observed between 1300 m and 1600 m of the profile.

A distribution of phase parameter of induced polarization against the background of the geological map of the Grabownica deposit is shown in figure 15. Analysing the map one can put a thesis that the contours of the Grabownica deposit can be accurately defined based on the phase parameter. Moreover, one can indicate sites for exploratory drillings within the deposit.

Induced polarization parameters provide qualitative information on hydrocarbon occurrence in the study area. Based on the magnitude of IP parameter anomalies one cannot evaluate a depth to the deposit. Hence it is recommended that IP measurements are integrated with other geophysical methods like CSAMT and reflection seismics.