

METODY ELEKTROMAGNETYCZNE W PROSPEKCJI NAFTOWEJ

Electromagnetic methods in petroleum prospecting

Michał STEFANIUK

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

Treść: Nasylenie węglowodorami powoduje anomalne zmiany własności fizycznych ośrodka geologicznego i pomierzonych pól geofizycznych, pozwalające na wykrywanie i rozpoznawanie złóż ropy naftowej i gazu ziemnego. Kompleksy złożowe charakteryzują się podwyższeniem oporności o 1–4 rzędy wielkości względem otoczenia. Kontrasty pojawiają się na granicy dolnej złoża pomiędzy skałą zbiornikową nasyconą zmineralizowaną wodą złożową i nasyconą węglowodorami oraz na jego granicy górnej z niskooporowymi, uszczelniającymi skałami ilastymi. Na granicy pomiędzy ropą naftową i wodą złożową pojawia się ponadto radykalny kontrast zdolności do polaryzacji elektrycznej ośrodka, wzbudzonej przez przepływ prądu. Pośrednim wskaźnikiem obecności złoża węglowodorów jest przypowierzchniowa strefa mineralizacji siarczkowej związana z dyfuzją węglowodorów, zmieniająca właściwości magnetyczne i polaryzowalność ośrodka. Prezentowane przykłady pochodzą ze strefy karpackiego złoża ropnego „Grabownica” oraz złoża gazowego „Rudka” w zapadlisku przedkarpackim.

Słowa kluczowe: metody elektromagnetyczne, złożo węglowodorów, komin dyfuzyjny, polaryzacja wzbudzona, magnetotelluryka

Abstract: Hydrocarbons saturating rocks give rise to anomalous changes in physical properties of geological medium and measured geophysical fields, thus allowing discovering and recognizing of oil and gas fields. Deposit complexes are characterized by resistivity increased by 1–4 orders of magnitude. Resistivity contrast appear at the lower boundary of deposit, between reservoir rock saturated with mineralized water and saturated with hydrocarbons, as well as at the upper boundary with low-resistivity sealing clayey rocks. Moreover, a contrast of environment’s ability to electric polarization induced by electric current flow appears at the boundary between hydrocarbons and formation water. The indirect indicator of a hydrocarbon deposit is the near-surface zone of sulfide mineralization connected with the hydrocarbon diffusion, which modifies magnetic properties and electric polarization ability of the medium. Examples of investigations made in the zone of the Carpathian oil field “Grabownica” and gas field “Rudka” in the Carpathian Foredeep are presented.

Key words: electromagnetic methods, magnetotellurics, induced polarization, hydrocarbon deposit, diffusion chimney

WSTĘP

W ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania stosowaniem tzw. niesejsmicznych metod geofizyki powierzchniowej, w tym metody magnetotellurycznej, w poszukiwaniach naftowych. Spowodowany jest on koniecznością prowadzenia prac prospekcyjnych w coraz bardziej złożonych warunkach geologicznych, w których interpretacja danych sejsmicznych jest niejednoznaczna lub wręcz niemożliwa, oraz technicznym i metodycznym rozwojem metod niesejsmicznych, związanym z zastosowaniem technik informatycznych (Stefaniuk 2005).

Metody elektromagnetyczne znajdują zastosowanie w przedstawionych poniżej problemach poszukiwawczych:

- we wstępnym, wyprzedzającym prace sejsmiczne rozpoznaniu strukturalnym i litologicznym,
- wspomaganiu interpretacji danych sejsmicznych,
- w bezpośrednim wykrywaniu i rozpoznawaniu akumulacji węglowodorów.

Relatywnie niskie, w porównaniu z metodą sejsmiczną, koszty badań elektromagnetycznych oraz ich stosunkowo wysoka uniwersalność są głównymi przyczynami ich wykorzystania do prac o charakterze zwiadowczym, które pozwalają na określenie stref perspektywicznych przeznaczonych do dalszego rozpoznawania sejsmicznego oraz na sformułowanie szczegółowych zadań dla metody sejsmicznej.

W poszukiwaniach i rozpoznawaniu złóż węglowodorów bezsprzecznie dominującą rolę odgrywa sejsmika refleksyjna. Zdarza się jednak czasami, że specyficzna budowa geologiczna i rozkład parametrów fizycznych uniemożliwiają uzyskanie dobrych danych sejsmicznych, a więc interpretację strukturalną i litologiczną. Sytuacja taka spowodowana jest na ogół obecnością ośrodka silnie tłumiącego lub rozpraszającego oraz ekranujących warstw silnie odbijających (Meju 2000).

Przykładem ośrodka o silnie tłumiących i odbijających fale sejsmiczne właściwościach są szeroko omawiane w literaturze pokrywy bazaltowe, zalegające blisko powierzchni ziemi i przykrywające miększe kompleksy osadowe. Rozpoznanie budowy geologicznej w takich sytuacjach umożliwiają metody geoelektryczne, zwłaszcza metoda magnetotelluryczna. Fale elektromagnetyczne są zdecydowanie dłuższe (o rząd wielkości lub więcej) od fal sejsmicznych wykorzystywanych w metodach refleksyjnych. Są one zatem słabiej tłumione i w mniejszym stopniu rozpraszane. Metody elektromagnetyczne charakteryzują się natomiast mniejszą rozdzielczością. Dane uzyskane metodami geoelektrycznymi nie są więc tak dokładne jak dobrej jakości dane sejsmiczne. Ponadto metody elektromagnetyczne oparte są na innych parametrach fizycznych ośrodka geologicznego niż metoda sejsmiczna, tzn. kompleksy silnie tłumiące lub odbijające falę sprężystą na ogół nie są silnie tłumione i odbijające dla fal elektromagnetycznych. W literaturze opisane są liczne przykłady wykorzystania metody magnetotellurycznej do rozpoznania kompleksów osadowych przykrytych pokrywami bazaltowymi, np. w strefie płaskowyżu Columbia w USA (Prieto *et al.* 1985) czy w obrębie basenu Parany w Ameryce Południowej (Stanley *et al.* 1985, Beamish & Travassos 1992).

Przykładem ośrodka silnie refleksyjnego, stanowiącego ekran dla fali sejsmicznej, są także kompleksy ewaporatów, takie jak utwory cechsztynu na obszarze Niżu Polskiego

i północnych Niemiec. Zastosowanie metody magnetotellurycznej w połączeniu z wykorzystaniem wysokiej jakości danych sejsmicznych dla części przekroju zalegającego powyżej granicy ekranującej daje szansę na lepsze rozpoznanie kompleksów zalegających poniżej. Uzyskanie wiarygodnych informacji odnoszących się do utworów podcechsztyńskich należy do najważniejszych problemów polskiej geologii, w szczególności poszukiwań naftowych. Z literatury światowej znane są doniesienia o magnetotellurycznych badaniach kompleksów podsolnych w Zatoce Meksykańskiej i u wybrzeży Kalifornii (Constable *et al.* 1998, Hoversten *et al.* 1998). Powyższe badania wykonane zostały w warunkach morskich, są więc ponadto przykładem wykorzystania metody magnetotellurycznej do rozpoznawania budowy geologicznej stref szelfowych.

Przykładem ośrodka intensywnie zaangażowanego tektonicznie, silnie rozpraszającego energię fal sprężystych i generującego trudny do interpretacji obraz fałowy są orogeny fałdowe, takie jak Karpaty Zewnętrzne, Apeniny czy młode pasmo górskie na Nowej Gwinei. Wykorzystanie metody magnetotellurycznej w takich warunkach na Nowej Gwinei prezentuje seria publikacji, które ukazały się w latach 90. ubiegłego wieku (Billings & Thomas 1990, Christopherson 1991, Hoversten 1996). Możliwość zastosowania metod elektromagnetycznych do rozpoznawania orogenów fałdowych jest szczególnie interesująca wobec znanych problemów z interpretacją sejsmicznych danych refleksyjnych w polskich Karpatach. Metoda magnetotelluryczna wykorzystywana jest tutaj do rozwiązywania zagadnień regionalnych i szczegółowych od ponad 30 lat (Stefaniuk 2001, 2003, Stefaniuk *et al.* 2003, 2008, Stefaniuk & Ślącza 2003). W skomplikowanych warunkach geologicznych, obok interpretacji strukturalnej, metody geoelektryczne próbuje się wykorzystywać do oszacowania rozkładu prędkości sejsmicznych lub jako źródło dodatkowych informacji wykorzystywanych w procedurach migracji głębokościowej danych sejsmicznych (den Boer *et al.* 2000).

Przedstawione powyżej uwagi i przykłady odnoszą się do ogólnego rozpoznania geologicznego kompleksów osadowych, a więc poszukiwań naftowych dotyczą jedynie pośrednio. Metody geoelektryczne wykorzystuje się także w tzw. bezpośrednich poszukiwaniach złóż węglowodorów. Zastosowania takie nie mają ciągle charakteru rutynowego w warunkach lądowych. Jednakże prowadzone są prace eksperymentalne, licznie relacjonowane w literaturze. W morskich poszukiwaniach naftowych można już w pewnym zakresie traktować powyższe badania jako rutynowe. Przedmiotem prezentowanego artykułu są głównie uwarunkowania bezpośrednich poszukiwań złóż węglowodorów oraz ich ewentualnego rozpoznawania z wykorzystaniem metod elektromagnetycznych, prowadzonych w warunkach lądowych.

Nasylenie ośrodka geologicznego węglowodorami powoduje specyficzne, anomalne zmiany jego własności fizycznych. Strefy nasycone generują więc anomalie w rozkładzie parametrów fizycznych ośrodka i pomierzonych pól geofizycznych, pozwalające w pewnym stopniu na wykrywanie obecności złóż, a nawet rozpoznawanie ich zasięgu, struktury i zmienności parametrów złożowych. Kompleksy złożowe charakteryzują się radykalnym podwyższeniem oporności ośrodka geologicznego o 1–4 rzędy wielkości. W szczególności wyraźne kontrasty pojawiają się na granicy dolnej złoża, tj. pomiędzy skałą zbiornikową nasyconą silnie zmineralizowaną wodą złożową i nasyconą ropą naftową lub gazem ziemnym oraz na granicy górnej złoża przykrytego niskooporowymi, uszczelniającymi skałami

ilastymi. Na granicy pomiędzy ropą naftową i wodą złożową pojawia się ponadto radykalny kontrast zdolności do polaryzacji elektrycznej ośrodka, wzbudzonej przez przepływ prądu. Skutkiem tego kontrastu jest anomalny rozkład parametrów polaryzacji, w szczególności anomalia tzw. parametru fazowego, zaznaczająca się w strefie konturu złoża.

Bezpośrednie odzwierciedlenie złoża w anomaliach powierzchniowych uzależnione jest jednak od jego rozmiarów i głębokości pograżenia, stąd też efekty związane z obecnością obiektów o niewielkich rozmiarach pograżonych na znacznych głębokościach są maskowane przez anomalie będące skutkiem zróżnicowania petrofizycznego nadkładu. Pośrednim wskaźnikiem obecności złoża węglowodorów jest przypowierzchniowa strefa zmian mineralogicznych związana z dyfuzją węglowodorów ze strefy złożowej ku powierzchni ziemi. Bezpośrednim efektem tych zmian jest powstanie w obrębie komina dyfuzyjnego strefy rozproszonej mineralizacji siarczkowej, zmieniającej głównie właściwości magnetyczne i polaryzowalność ośrodka geologicznego (Pirson 1978, Sternberg 1991).

Badania rozkładu oporności, parametrów polaryzacji i anomalii procesów przejściowych przedstawione w niniejszym artykule wykonane zostały w strefach złóż ropnych „Grabownica” i „Łodyna” znajdujących się w obrębie karpaccich struktur fliszowych oraz w strefie złoża gazowego „Rudka” w zapadlisku przedkarpaccim. Złoża te zalegają stosunkowo płytko, a więc zaznaczają się w rozkładzie wyinterpretowanych parametrów geofizycznych pomimo swoich niewielkich rozmiarów. W szczególności strefy nasycone zaznaczają się jako względnie wysokooporowe, a na konturach złóż pojawiają się specyficzne anomalie parametru fazowego polaryzacji wzbudzonej.

MODEL GEOELEKTRYCZNY ZŁOŻA WĘGLOWODORÓW

Akumulacje węglowodorów w tzw. pułapkach złożowych tworzą złoża. Podstawowym typem pułapki złożowej jest pułapka strukturalna, a więc kompleks skał zbiornikowych, w kształcie kopuły, przykryty nieprzepuszczalną warstwą uszczelniającą (Fig. 1). W obrębie formacji klastycznych skałami zbiornikowymi są porowate i/lub szczelinowate piaskowce nasycone głównie zmineralizowaną wodą złożową. Oporności tego typu skał zależne są głównie od porowatości, nasycenia wodą złożową i stopnia mineralizacji wody złożowej (Fig. 2, 4). Skałę zbiornikową o wysokim współczynniku porowatości, nasyconą silnie zmineralizowaną wodą złożową, charakteryzują względnie niskie oporności mieszczące się w przedziale od kilku do kilkudziesięciu omometrów (Srńka 2007). Oporności skały zbiornikowej nasyconej ropą naftową lub gazem ziemnym na ogół natomiast mieszczą się w granicach od kilkudziesięciu do kilku tysięcy omometrów. Przykład wpływu nasycenia gazem ziemnym na rozkład oporności w obrębie utworów górnokredowych w podłożu zapadliska przedkarpacciego przedstawia figura 3 (na wklejce). Na wykresach elektrometrii otworowej zaznacza się różnica oporności o 2–3 rzędy wielkości wewnątrz wysoko porowatych piaskowców cenomanu pomiędzy strefą nasyconą zmineralizowaną wodą złożową a strefą wypełnioną gazem ziemnym (Fig. 3B). Figura 5 przedstawia empirycznie określone zakresy zmienności oporności różnych rodzajów skał zbiornikowych, nasyconych zmineralizowanymi wodami złożowymi i węglowodorami (Srńka 2007). Oporności skał zbiornikowych zależne są od kombinacji różnych czynników petrofizycznych i geologicznych. Najważ-

niejsze czynniki to porowatość skał zbiornikowych, geometria porów, litologia skały, relacje pomiędzy nasyceniem wodą złożową i węglowodorami, mineralizacja wody złożowej i temperatura ośrodka geologicznego (Dzwinel 1974, Natkaniec 1977). Empirycznie określone zróżnicowanie oporności piaskowców o dobrych parametrach zbiornikowych, nasyconych zmineralizowaną wodą złożową i węglowodorami, kształtuje się na poziomie 1–4 rzędów wielkości (Fig. 3, 5).

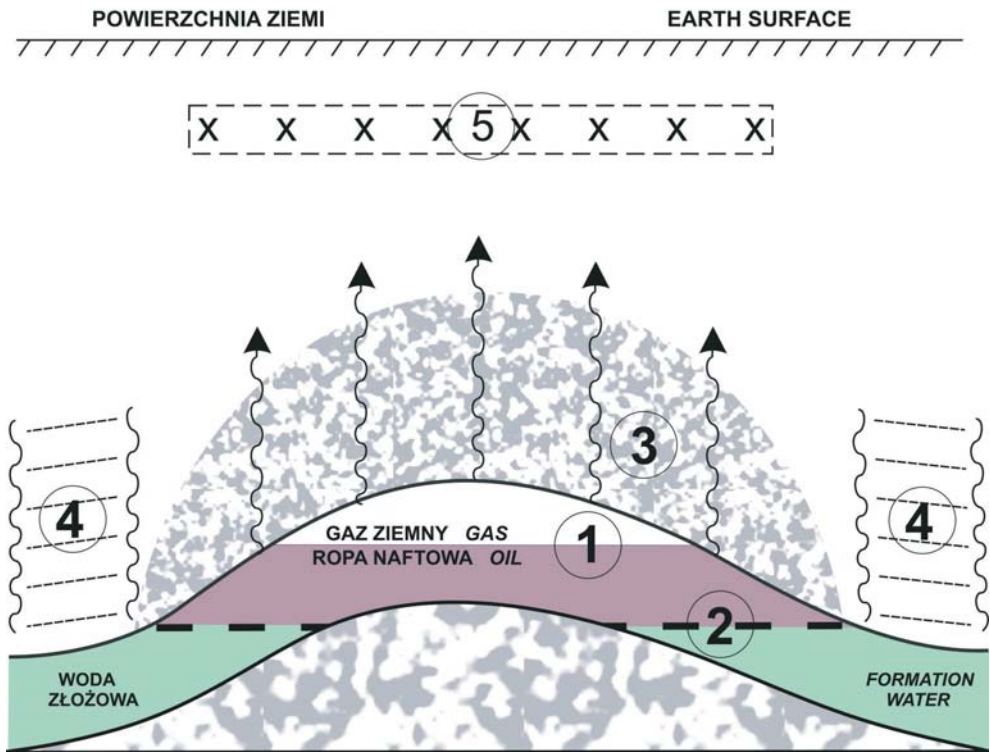


Fig. 1. Model złoża węglowodorów (wg Hughesa *et al.* 1984, Karusa *et al.* 1985): 1 – złożo, 2 – kontakt węglowodorów z wodą złożową, 3 – komin dyfuzyjny, 4 – granice strefy zmian petrofizycznych i geochemicznych, 5 – strefa przypowierzchniowych zmian elektrochemicznych

Fig. 1. Model of hydrocarbon deposit (after Hughes *et al.* 1984, Karus *et al.* 1985): 1 – deposit, 2 – contact of hydrocarbons with formation water, 3 – diffusion chimney, 4 – boundaries of petrophysical and geochemical alterations, 5 – zone of near-surface electrochemical alterations

W obrębie formacji klastycznych typowym kompleksem uszczelniającym są warstwy zbudowane ze skał ilastych lub ilasto-mułowcowych. Skały te również charakteryzują się bardzo niskimi opornościami (Fig. 5). Ponadto skuteczną izolację hydrauliczną zapewniają miększe kompleksy uszczelniające. W tej sytuacji złożo węglowodorów zaznacza się jako strefa o anomalnie wysokich opornościach w otoczeniu ośrodka niskoporowego.

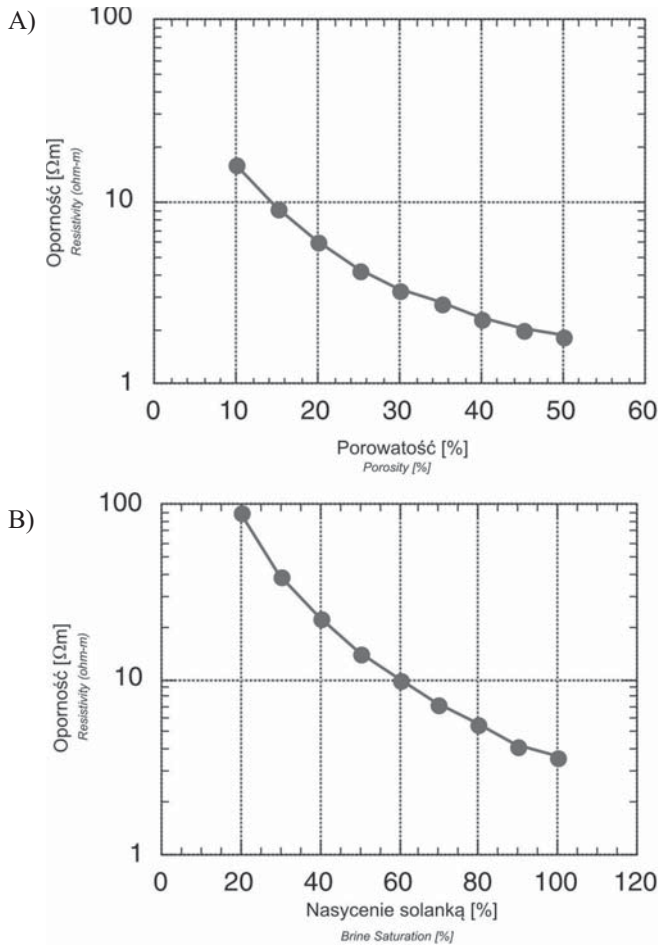


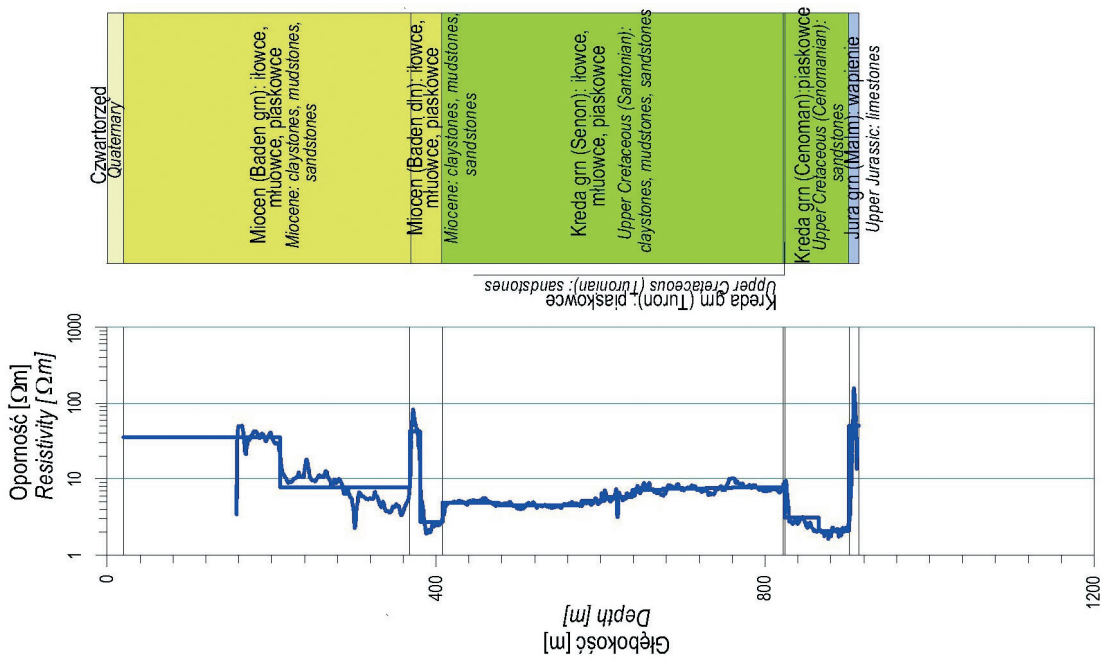
Fig. 2. Zależność oporności skały zbiornikowej od porowatości (A) i nasycenia solanką (B) (wg Wilt & Allumbaugh 1998)

Fig. 2. Resistivity of reservoir rocks versus porosity (A) and brine saturation (B) (after Wilt & Allumbaugh 1998)

Mniej korzystnie relacje oporności złoża węglowodorów i otaczającego go ośrodka geologicznego kształtują się w obrębie kompleksów węglanowych i mieszanych, klastyczno-ewaporatowych, klastyczno-węglanowych i węglanowo-ewaporatowych. Oporności skał węglanowych są na ogół względnie wysokie, a ich wartości obniża nasycenie zmineralizowanymi wodami złożowymi. Oporności kompleksów uszczelniających ewaporatowych, tj. soli, gipsów i anhydrytów, są porównywalnie wysokie w stosunku do skał zbiornikowych nasyconych węglowodorami (Fig. 5). Wysokooporowe, na ogół, jest również uszczelnienie węglanowe. W tej sytuacji kontrasty opornościowe pomiędzy strefą złożową i otoczeniem zanikają lub też są mniej wyraźne w porównaniu ze złożami występującymi w formacjach klastycznych.

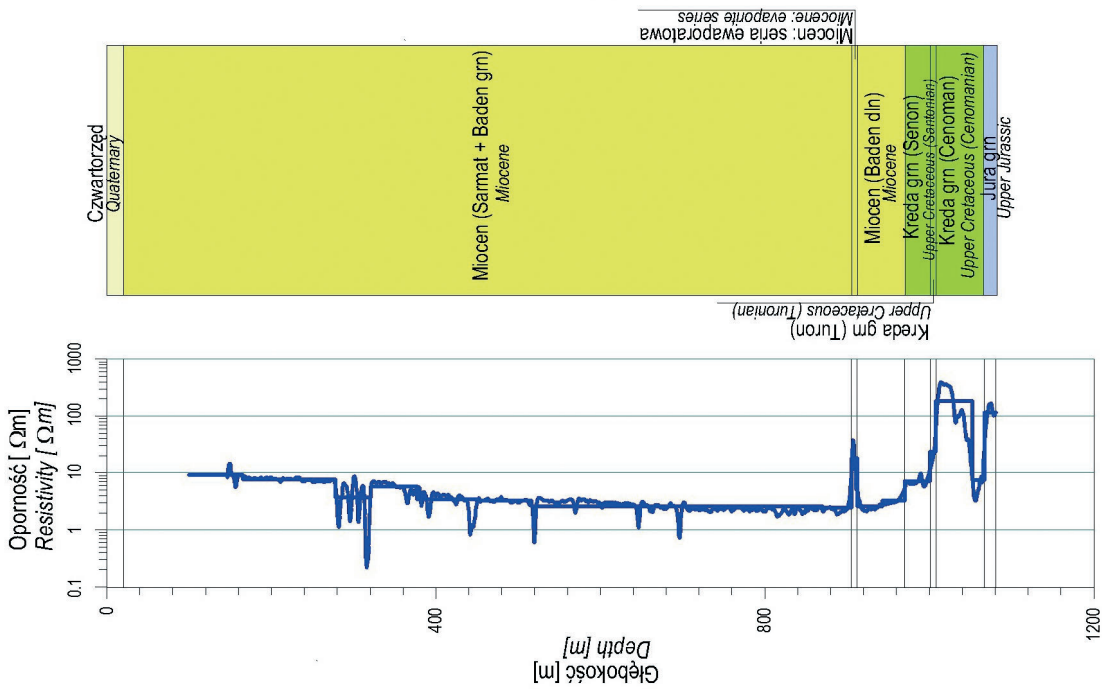
K-3

C)



R-5

B)



R-1

A)

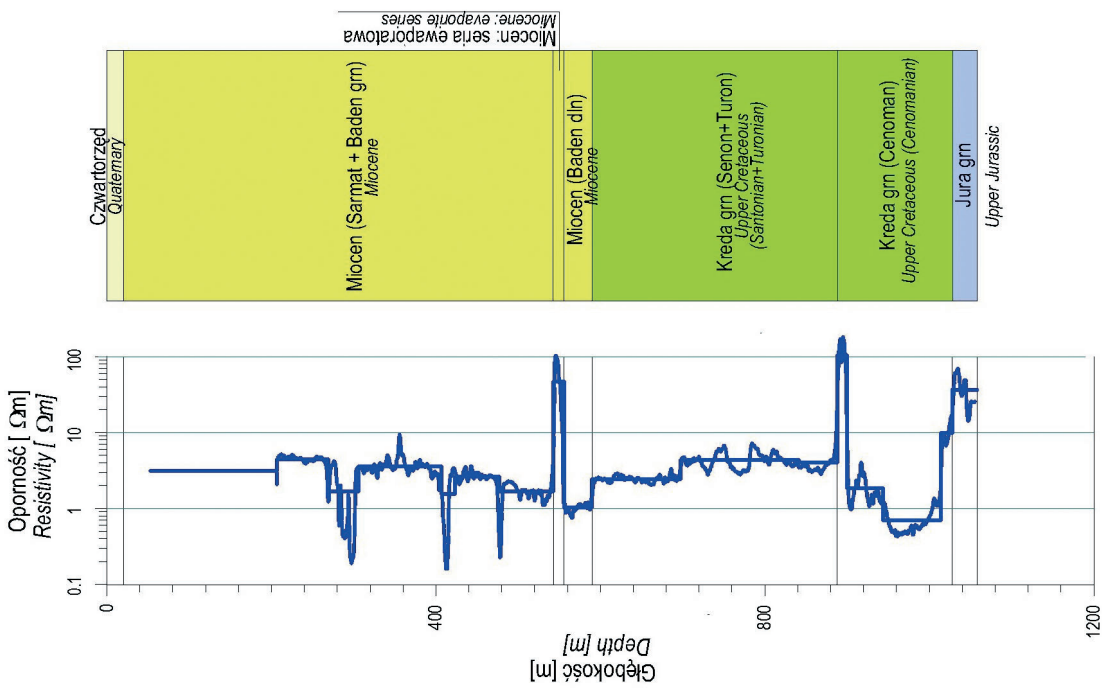


Fig. 3. Kontrast oporności piaskowców nasyconych zmineralizowaną wodą złożową i gazem ziemnym (wg Wojdyła *et al.* 2010)

Fig. 3. Resistivity contrast between sandstones saturated with mineralized formation water and with natural gas (after Wojdyła *et al.* 2010)

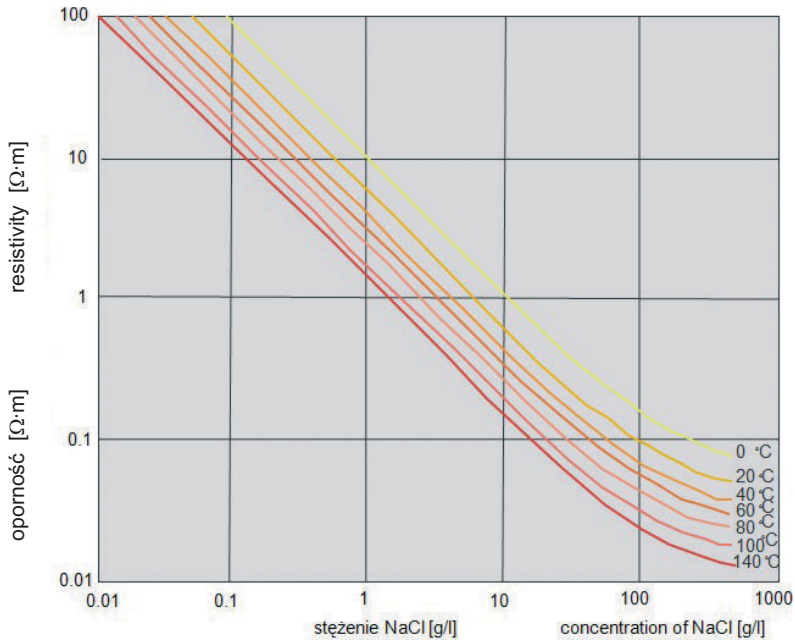


Fig. 4. Zależność oporności solanki od stężenia i temperatury (wg Kellera & Frischknechta 1966)

Fig. 4. Brine resistivity versus concentration and temperature (after Keller & Frischknecht 1966)

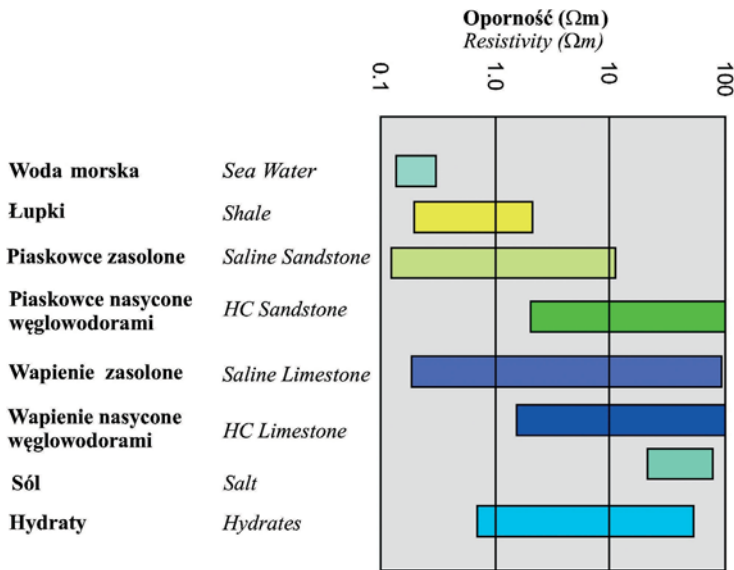


Fig. 5. Zakresy zmian oporności skał zbiornikowych i uszczelniających (wg Srnki 2007)

Fig. 5. Ranges of resistivity changes of reservoir and sealing rocks (after Srnka 2007)

Oporność elektryczna jest podstawowym parametrem charakteryzującym ośrodek geologiczny w metodach elektromagnetycznych. Nie jest to jednak parametr jedyny. Na propagację pola elektromagnetycznego w ośrodku geologicznym wpływ mają ponadto takie parametry, jak przenikalność elektryczna, przenikalność magnetyczna oraz polaryzowalność, czyli zdolność ośrodka do generowania pola elektrycznego wskutek rozdziału (polaryzacji) ładunku elektrycznego. Miarą zdolności ośrodka do generowania pola wtórnego pod wpływem przepływającego prądu jest parametr (współczynnik) polaryzacji η , określający stosunek pola elektrycznego indukowanego do pola pierwotnego (Cole & Cole 1941, Davydycheva *et al.* 2006, Wojdyła *et al.* 2011). Elektrochemiczny mechanizm powstawania pola wzbudzonego nie jest jednoznacznie rozpoznany pomimo badań tego efektu trwających od blisko stu lat (Schlumberger 1920, Veeken *et al.* 2009). Polaryzacja wzbudzona ma charakter procesu przejściowego zachodzącego pod wpływem pola zewnętrznego (przepływu prądu) w ośrodku przewodzącym o zróżnicowanych własnościach elektrochemicznych (Kamenetsky *et al.* 2010). Na ogół wyróżnia się trzy główne mechanizmy wzbudzania prądów wtórnych w ośrodku geologicznym, tj. polaryzację typu elektrodowego, polaryzację typu membranowego oraz polaryzację związaną ze złożoną reakcją materii pochodzenia organicznego na przepływ prądu (Olhoeft 1985, Davydycheva *et al.* 2006).

Polaryzacja typu elektrodowego pojawia się na kontakcie minerałów metalicznych z roztworami porowymi wskutek specyficznych procesów elektrochemicznych. Potencjały membranowe występują zwykle na granicy utworów piaszczystych i ilastych w rezultacie zróżnicowania ruchliwości (masy) jonów dodatnich i ujemnych, co jest przyczyną ich różnej zdolności do przenikania przez granicę ośrodków o odmiennych cechach litologicznych, przede wszystkim przepuszczalności. Najbardziej istotna dla poszukiwań węglowodorów jest jednak polaryzacja związana z deformacją elektrycznej warstwy podwójnej, powstającej na granicy stałego szkieletu skalnego i roztworów porowych. Proces ten jest związany z rodzajem nasycającego medium.

Doniesienia literaturowe wskazują, że istotny wpływ na wielkość efektu polaryzacji wzbudzonej ma zawartość materii pochodzenia organicznego, w tym nasycenie przestrzeni porowej węglowodorami. Na podstawie badań laboratoryjnych stwierdzono m.in. przesunięcie fazowe (odpowiedzi fazowej) pola indukowanego w zmiennym polu elektromagnetycznym w stronę niższych częstotliwości względem częstotliwości pola pierwotnego (Olhoeft 1985, Davydycheva *et al.* 2006). Anomalne wartości parametrów polaryzacji wzbudzonej w strefach nasyconych węglowodorami stwierdzono na podstawie danych geofizyki otworowej (Veeken *et al.* 2009, 2010) (Fig. 6).

Związki pomiędzy parametrami charakteryzującymi ośrodek geoelektryczny w polu prądu zmiennego opisuje poniższe równanie, określające tzw. przewodność zespoloną (Davydycheva *et al.* 2006)

$$\sigma(i\omega) = \sigma_0 \left(1 - \frac{\eta}{1 + (i\omega\tau)^c} \right),$$

gdzie:

- $\sigma(i\omega)$ – przewodność zespolona,
- ω – częstość kołowa pola elektromagnetycznego,
- σ – przewodność ośrodka w polu prądu stałego (składowa rzeczywista),
- η – współczynnik polaryzacji,
- τ – stała czasowa zaniku pola indukowanego,
- c – stała relaksacji.

Zależność powyższa wynika z tzw. empirycznego modelu przewodności, zastosowanego do opisu efektu polaryzacji wzbudzonej (Cole & Cole 1941, Pelton *et al.* 1978, Davydcheva *et al.* 2006).

Parametry opisujące zjawisko polaryzacji wzbudzonej wchodzi w skład tzw. urojonej składowej przewodności ośrodka. Z danych literaturowych wynika, że nasycenie przestrzeni porowatej węglowodorami powoduje wielokrotne zwiększenie wartości stałej zaniku pola indukowanego τ . Reasumując, złożo węglowodorów generuje anomalne wartości parametrów polaryzacji wzbudzonej η , czasowej stałej zaniku τ oraz tzw. przesunięcia fazowego pomiędzy polem pierwotnym i indukowanym (Fig. 7). Dyskusyjne pozostaje, czy obserwowane na powierzchni ziemi anomalne efekty polaryzacji wzbudzonej generowane są przez samo złożo, a w szczególności procesy elektrochemiczne zachodzące na kontakcie wody złożowej i węglowodorów, czy też należy je wiązać z omówionymi poniżej zjawiskami elektrochemicznymi, zachodzącymi w strefie tzw. komina dyfuzyjnego powstającego nad złożem.

W ośrodku geologicznym, obok opisanych powyżej indukowanych potencjałów elektrycznych, występują także zjawiska naturalne prowadzące do rozdziału ładunku, a tym samym powstania spontanicznych potencjałów elektrycznych. Procesy te mają podobny charakter jak w przypadku polaryzacji wzbudzonej, nie występuje tutaj jednak sztuczny czynnik stymulujący, jakim jest przepływ prądu. Potencjały samoistne (spontaniczne, naturalne) generowane są przez procesy elektrochemiczne zachodzące w ośrodku geologicznym, takie jak utlenianie redukcja, dyfuzja i filtracja jonów w ośrodku porowatym. Zachodzą one m.in. na granicy ośrodków o różnych własnościach fizyczno-chemicznych, np. pomiędzy uszczelniającymi skałami ilastymi a porowatymi skałami zbiornikowymi lub na kontakcie zmineralizowanych wód złożowych z węglowodorami.

Procesy te prowadzą do nagromadzenia nadmiaru ładunków dodatnich w złożu, na jego granicy oraz ładunków ujemnych w bezpośrednim sąsiedztwie złoża (Fig. 8). Analiza procesów powstawania naturalnej polaryzacji złoża doprowadziła do sformułowania tzw. monopolarnego modelu złoża węglowodorów (Dzwinel 1975, 1976). Według tego modelu złożo węglowodorów może wytwarzać pole potencjałów naturalnych zauważalnych na powierzchni ziemi i pozwalające na określenie granic złoża, a nawet jego głębokości.

Jak wspomniano we wstępie, anomalie generowane bezpośrednio przez obecność złoża w przestrzeni geologicznej nie zawsze są zauważalne na powierzchni. Akumulacja węglowodorów prowadzi jednak do specyficznych zmian geochemicznych jego otoczenia. Szczególnie interesujące w pracach poszukiwawczych są zmiany pojawiające się w strefie tzw. komina dyfuzyjnego, czyli strefie migracji węglowodorów ze złoża ku powierzchni ziemi. Migracja węglowodorów prowadzi do specyficznych zmian mineralogicznych w strefie przypowierzchniowej generujących zauważalne anomalie geofizyczne.

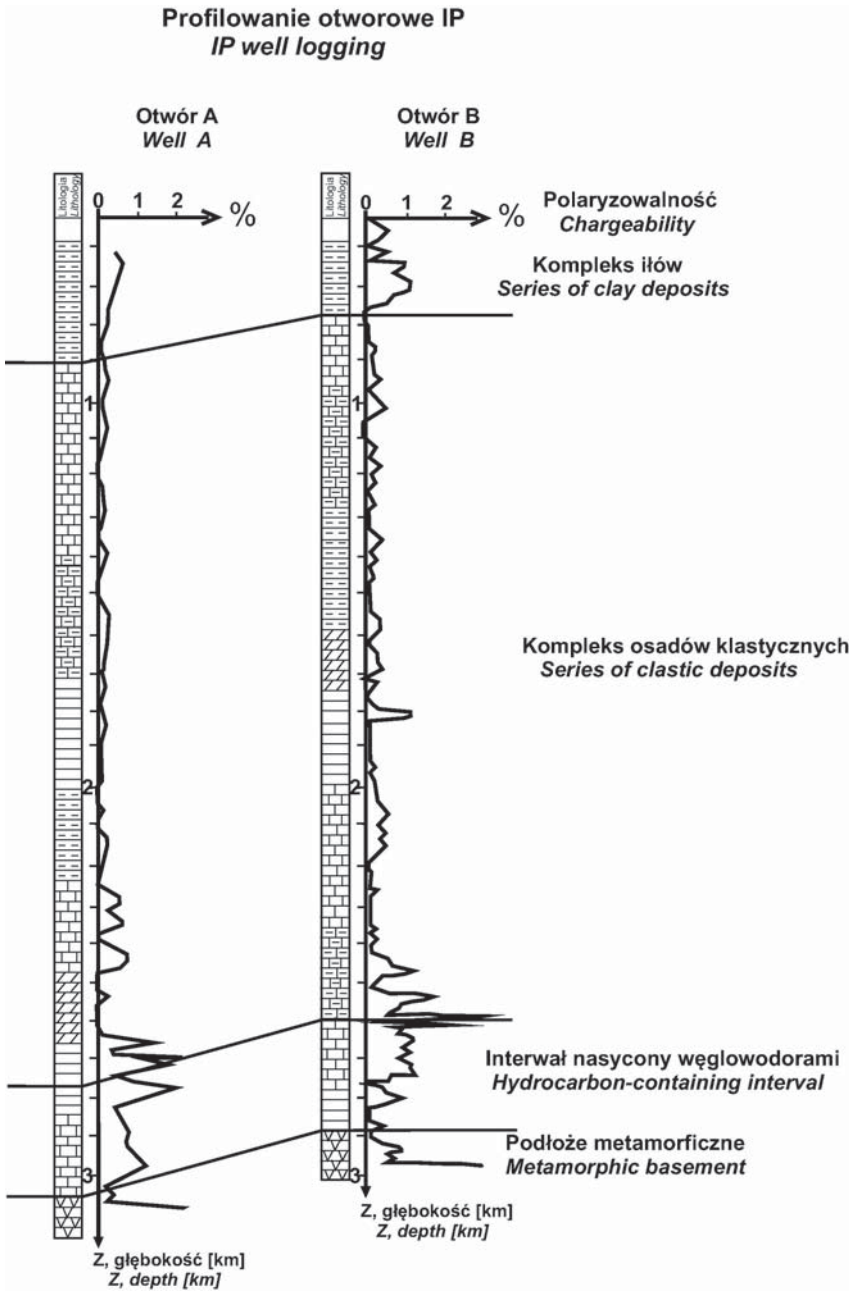


Fig. 6. Profelowania otworowe polaryzacji wzbudzonej dla formacji złożowej (Moisseev 2002, za: Veekenem *et al.* 2010)

Fig. 6. Induced polarization well-logs for deposit formation (Moisseev 2002, after Veeken *et al.* 2010)

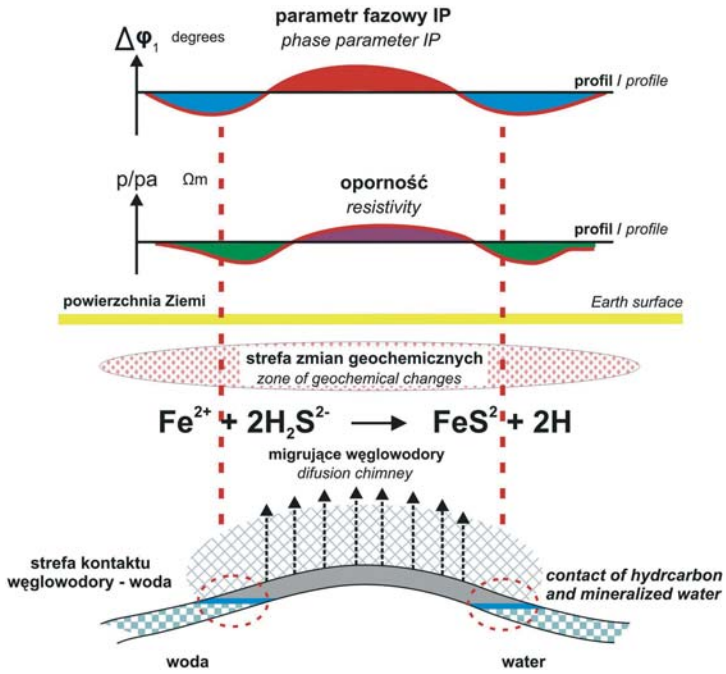


Fig. 7. Model geoelektryczny złoża węglowodorów (zestawiony na podstawie różnych źródeł)

Fig. 7. Geoelectric model of hydrocarbon deposit (compiled based on several unpublished data)

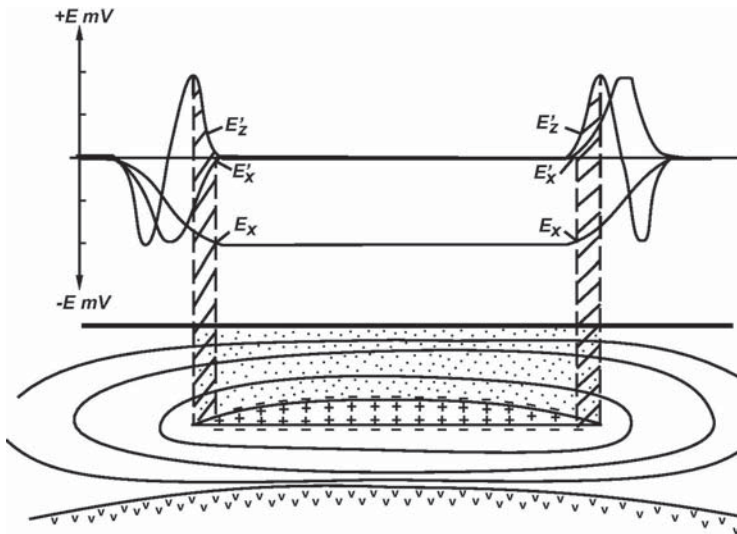


Fig. 8. Monopolarny model elektrostatyczny złoża węglowodorów (wg Dzwiniela 1975)

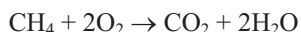
Fig. 8. Monopolar electrostatic model of hydrocarbon deposit (after Dzwiniel 1975)

FIZYCZNE I GEOCHEMICZNE PROCESY GENERUJĄCE ANOMALNE ZJAWISKA GEOELEKTRYCZNE W OTOCZENIU ZŁÓŻ WĘGLOWODORÓW

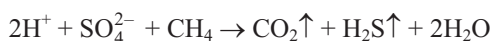
Procesy zachodzące w otoczeniu stref akumulacji węglowodorów i prowadzące do powstania anomalnych pól elektrycznych i magnetycznych lub anomalnego rozkładu parametrów elektrycznych badane są od około 40 lat. Udokumentowane anomalie geoelektryczne wiązane są zwykle ze strefami przenikania węglowodorów ze złoża w kierunku powierzchni czyli tzw. kominami dyfuzyjnymi tworzącymi się nad złożami ropy naftowej i gazu ziemnego (Fig. 1). Migrujące węglowodory wywołują, w odpowiednich warunkach, szereg zmian w ośrodku skalnym, które mogą być rejestrowane na powierzchni (Fig. 7).

Koncepcja wertykalnej migracji węglowodorów ze złoża ku powierzchni ziemi ciągle uważana jest za kontrowersyjną. Badania geochemiczne i geofizyczne potwierdzają jednak obecność komina dyfuzyjnego w sytuacji, gdy zamknięcie złoża nie jest zbyt szczelne. Migracja lekkich węglowodorów, głównie metanu, etanu, propanu i butanu w postaci „mikrobaniek” wypieranych przez wody złożowe, może się odbywać wertykalnie przez warstwę uszczelniającą (Fig. 9) lub poprzez system różnorodnych spękań w nadkładzie (Fig. 10). Spękania, w szczególności strefy uskokowe, mogą kanalizować migrację węglowodorów, powodując pojawienie się anomalii przypowierzchniowych lub powierzchniowych, często w znacznym oddaleniu od złoża (Saunders *et al.* 1999, Khan & Jacobson 2008).

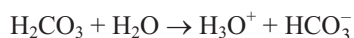
Z migracją węglowodorów związane są specyficzne zmiany geochemiczne. Schemat powyższych zmian zachodzących w różnych strefach komina dyfuzyjnego przedstawia opis zamieszczony na figurze 9 (Saunders *et al.* 1999). Występowanie i intensywność tych procesów uwarunkowane są warunkami geologicznymi, a zwłaszcza geochemicznymi w strefie komina dyfuzyjnego. W zawodnionych skałach klastycznych, bogatych w żelazo, obserwuje się wytrącanie minerałów siarczkowych tj. piryty, markasytu i pirotynu, oraz tlenków żelaza, np. magnetytu. Powyższe procesy odbywają się przy współdziałaniu bakterii tlenowych, które konsumując cząstki węglowodorów, zużywają tlen, co prowadzi do powstania środowiska redukcyjnego i odpowiednich warunków do rozwoju bakterii beztlenowych



Wskutek metabolizmu beztlenowców powstają jony wodorowy i siarczanowy, które w reakcji z metanem uwalniają dwutlenek węgla (CO_2) i siarkowodor (H_2S)



Na wyższym poziomie komina dyfuzyjnego migrujący dwutlenek węgla rozpuszcza się w wodzie, tworząc roztwór kwasu węglowego (H_2CO_3):



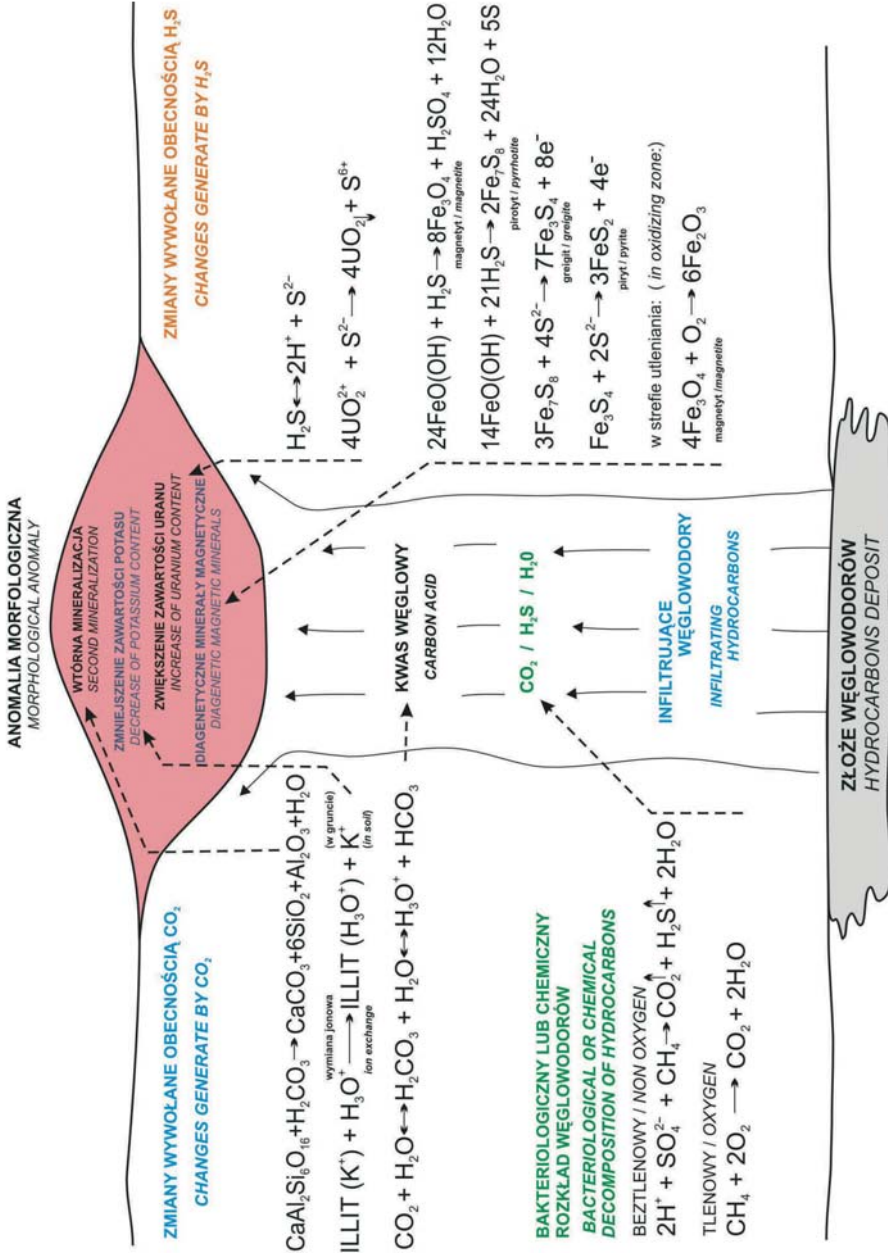


Fig. 9. Model zmian geochemicznych w strefie komina dyfuzyjnego nad złożem węglowodorów (wg Saundersa *et al.* 1999)
Fig. 9. Model of geochemical alterations in the zone of diffusion chimney over hydrocarbon deposit (after Saunders *et al.* 1999)

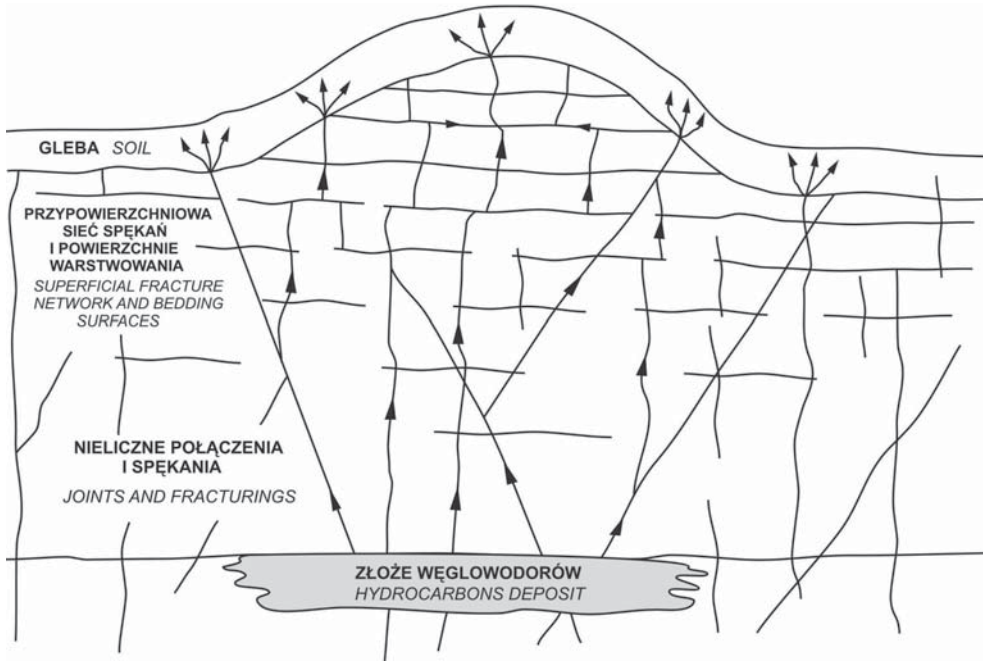
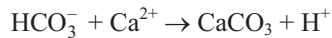


Fig. 10. Model migracji węglowodorów poprzez system spękań w nadkładzie złoża (wg Saundersa *et al.* 1999)

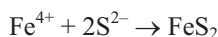
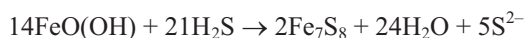
Fig. 10. Hydrocarbons migration through the system of fractures in the deposit overburden (after Saunders *et al.* 1999)

Migrujący kwas węglowy w strefie przypowierzchniowej reaguje z wolnymi jonami wapnia lub rozkłada glinokrzemiany wapnia, prowadząc do strącania kalcytu (CaCO_3) oraz tlenków glinu i krzemu (Sternberg 1991, Saunders *et al.* 1999):

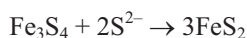
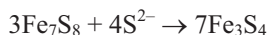


Przemieszczający się ku górze siarkowodor w strefie przypowierzchniowej ulega dysocjacji w warunkach utleniających oraz wchodzi w reakcje z wodorotlenkami żelaza (getyt – $\text{FeO}(\text{OH})$), strącając magnetyt (Fe_3O_4) i pirotyt (Fe_7S_8). Wolne jony siarki i żelaza łączą się, tworząc piryt (FeS_2):





Piryt i markasyt powstają także w kolejnych reakcjach siarczków żelaza z wolnymi jonami siarki:



Obecność w skałach rozproszonego pirytu o odpowiedniej koncentracji będzie źródłem anomalnej polaryzacji elektrycznej ośrodka, wzbudzonej przez przepływ prądu. Kalcyt wypełnia natomiast pory skalne, powodując zwiększenie oporności skał.

W środowisku redukcyjnym komina dyfuzyjnego w odpowiednich warunkach geochemicznych wzrasta koncentracja epigenetycznych minerałów magnetycznych (Donovan *et al.* 1984, Kobański 1994), z których część, np. magnetyt, pirotyn, charakteryzuje się doskonałym przewodnictwem elektrycznym typu elektronowego. Minerale magnetyczne podobnie jak minerale siarczkowe występują w postaci rozproszonej, będą więc oddziaływały na wielkość efektu polaryzacji wzbudzonej. Mogą też generować anomalne namagnesowanie ośrodka.

Geneza środowiska redukcyjnego wywołanego przez migrację węglowodorów nie musi być związana z działalnością organizmów żywych. Zjawisko to może być efektem procesów absorpcyjnych w skałach ilastych, które prowadzą do uwalniania ładunków ujemnych (Pirson 1973). Mechanizmy zmian geochemicznych w obrębie komina dyfuzyjnego nie zostały jeszcze do końca wyjaśnione. Koncepcja tych procesów ciągle uważana jest za kontrowersyjną. Ich występowanie uzależnione jest od warunków geochemicznych, mineralogicznych, hydrogeologicznych i innych panujących w nadkładzie złoża, w szczególności w jego strefie przypowierzchniowej. Badania licznych złóż na świecie potwierdzają jednak obecność skutków opisywanych powyżej procesów (Oehler & Sternberg 1984, Sternberg 1991, Saunders *et al.* 1999). Zaobserwowano podwyższoną koncentrację minerałów siarczkowych i kalcytu w strefie położonej nad złożem w stosunku do strefy poza nim (Fig. 11, 12). Według danych geofizyki otworowej nad złożami często występują specyficzne płytkie warstwy o wyraźnie podwyższonej oporności skorelowanej z podwyższoną wartością kąta fazowego polaryzacji wzbudzonej (Fig. 13). Badania laboratoryjne potwierdzają także obecność podwyższonych koncentracji węglowodorów w strefie przypowierzchniowej ponad złożami, skorelowanych z podwyższoną zawartością siarczków i tlenków żelaza oraz kalcytu (Oehler & Sternberg 1984, Sternberg 1991, Khan & Jacobson 2008).

Skutkiem procesów geochemicznych wytwarzających w obrębie komina dyfuzyjnego środowisko redukcyjne jest, obok zmian mineralogiczno-petrograficznych, wytwarzanie się stałego nadmiaru ładunków ujemnych (Fig. 14). Inaczej mówiąc, w strefie dyfuzji pomiędzy złożem a powierzchnią ziemi wytwarza się wielkie ogniwo elektryczne ładowane nieprzerwanie przez dopływ węglowodorów (Pirson 1973).

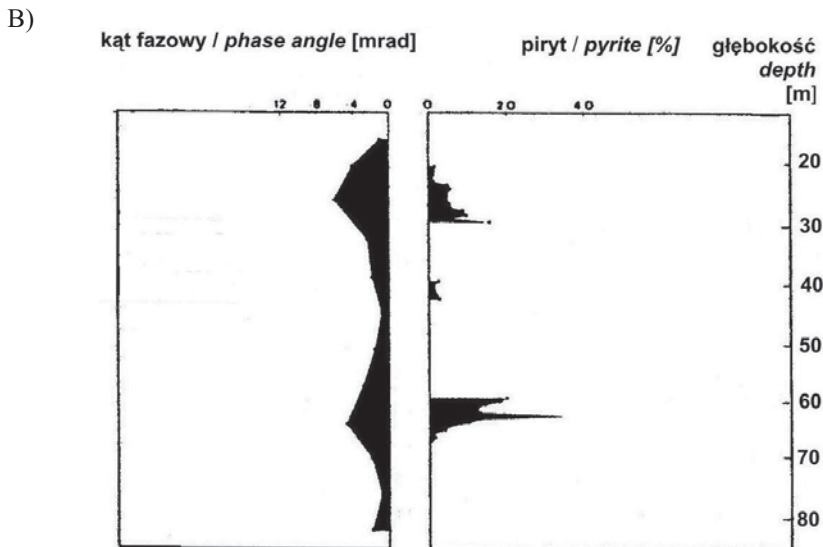
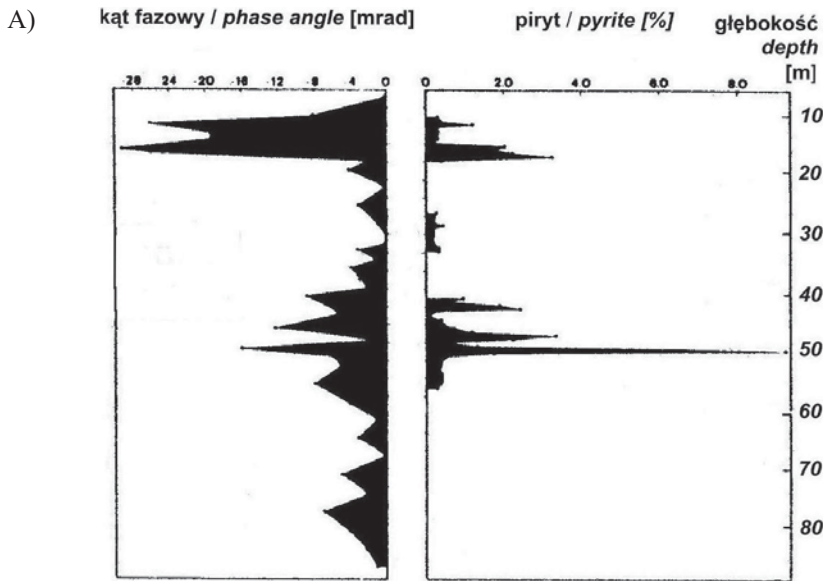


Fig. 11. Zależność kąta fazowego polaryzacji wzbudzonej od zawartości pirytu w warstwach przypowierzchniowych nad złożem węglowodorów (A) i poza złożem (B) (wg Oehlera & Sternberga 1984)

Fig. 11. Phase angle of induced polarization versus pyrite content in the near-surface layer over hydrocarbons deposit (A) and outside deposit (B) (after Oehler & Sternberg 1984)

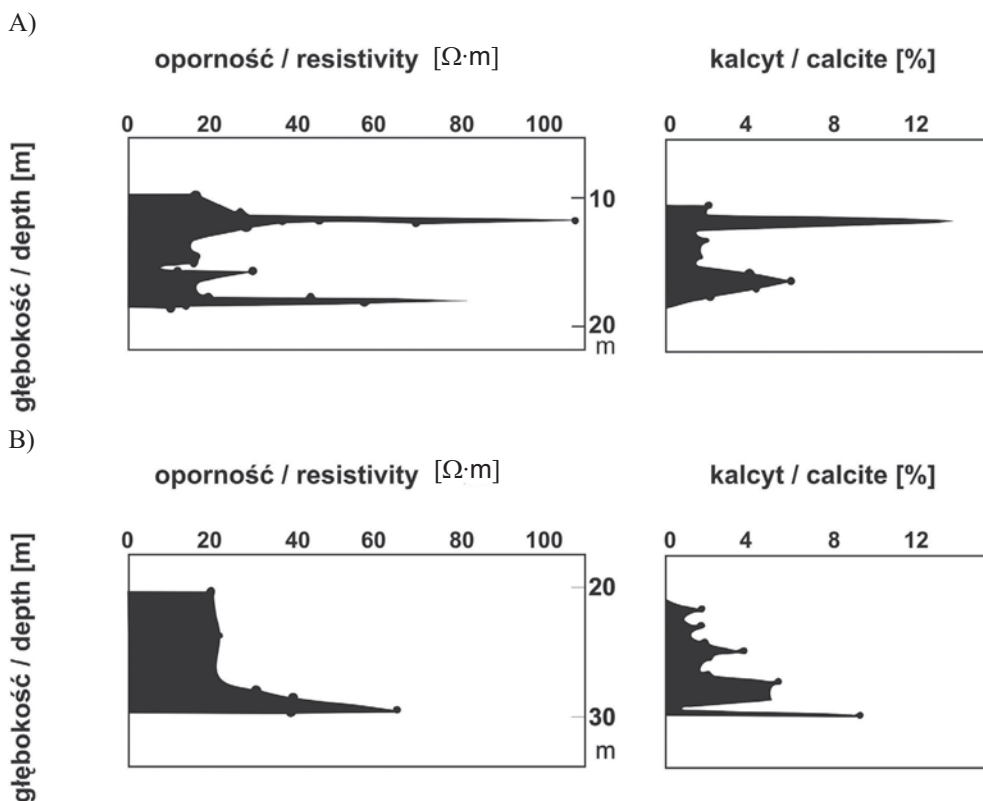


Fig. 12. Zależność oporności od zawartości kalcytu w warstwie przypowierzchniowej nad złożem węglowodorów (A) i poza złożem (B) (wg Oehler & Sternberga 1984)

Fig. 12. Resistivity versus calcite content in the near-surface lager over hydrocarbons deposit (A) and outside deposit (B) (after Oehler & Sternberg 1984)

Ponieważ obszar poza kominem dyfuzyjnym jest elektrycznie obojętny lub naładowany dodatnio, w strefie okołozłożowej wytwarza się prąd elektryczny skierowany do wewnątrz komina dyfuzyjnego, czyli tzw. efekt elektrotelluryczny (Fig. 14, 15). Na powierzchni skutki efektu elektrotellurycznego obserwowane są w postaci anomalii pola magnetycznego (efekt magnetoelektryczny – ME) oraz anomalii tzw. potencjałów spontanicznych.

Jak wspomniano w poprzednim rozdziale, istnieje również pogląd, że złoża węglowodorów powstające w skałach piaskowcowych uszczelnionych łałami ładują się ujemnie wskutek nie do końca wyjaśnionych procesów elektrochemicznych (Dzwinel 1974, 1973). Złoże staje się więc typowym ciałem naładowanym ujemnie i wytwarza anomalię stacjonarnego pola elektrycznego (Fig. 8). Bezpośrednia anomalia pochodząca od spolaryzowanego złoża i anomalia wywołana efektem elektrotellurycznym sumują się, dając całkowitą anomalię potencjałów spontanicznych strefy złożowej.

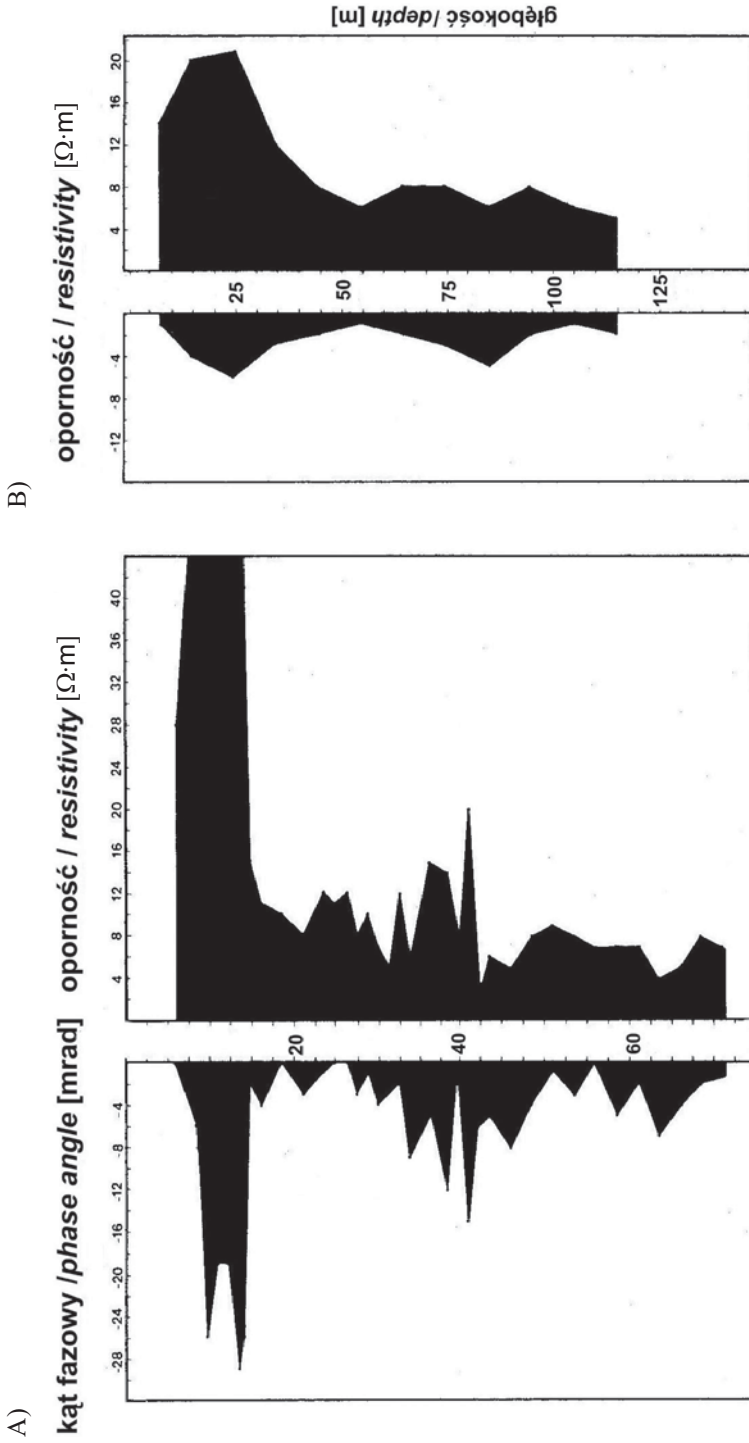


Fig. 13. Korelacja pomiędzy opornością i kątem fazowym polaryzacji wzbudzonej w warstwie przy powierzchniowej nad złożem węglowodorów (A) i poza złożem (B) (wg Oehler & Sternberga 1984)

Fig. 13. Correlation between resistivity and phase angle of induced polarization in the near-surface layer over hydrocarbons deposit (A) and outside deposit (B) (after Oehler & Sternberg 1984)

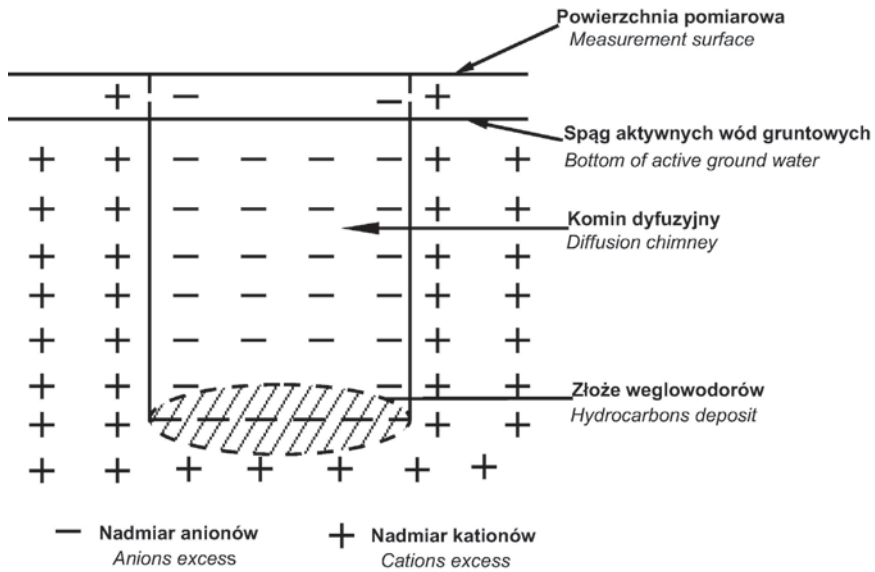


Fig. 14. Rozkład ładunków elektrycznych w strefie komina dyfuzyjnego (wg Pirsona 1973, w: Dzwinel 1976)

Fig. 14. Electric charge distribution in the diffusion chimney zone (after Pirson 1973, in: Dzwinel 1976)

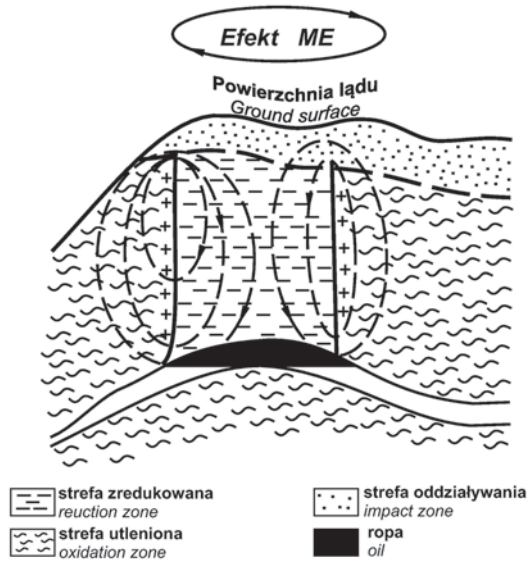


Fig. 15. Procesy elektromagnetyczne w strefie komina dyfuzyjnego (wg Pirsona 1973); ME – efekt magnetoelektryczny

Fig. 15. Electromagnetic processes in the diffusion chimney zone (after Pirson 1973); ME – magneto-electric effect

PRZEGLĄD GEOELEKTRYCZNYCH METOD BEZPOŚREDNIEJ PROSPEKCJI ZŁOŻ WĘGLOWODORÓW

Anomalne zjawiska elektromagnetyczne towarzyszące strefom akumulacji węglowodorów stanowią podstawę zastosowania metod geoelektrycznych do bezpośredniego wykrywania złóż. Doświadczenia zebrane w trakcie dotychczasowych badań wskazują, że występowanie i intensywność powyższych zjawisk oraz możliwość ich pomierzenia uzależnione są od wielu czynników. Najistotniejsze z nich to budowa geologiczna i obecność sztucznych źródeł zakłócających.

Litologia i chemizm kompleksu warstw przykrywających złożę decydują o intensywności migracji węglowodorów i zmian mineralogicznych w obrębie komina dyfuzyjnego.

Według Sternberga (1991) zjawiska anomalne występują, jeśli spełnione są następujące warunki:

- w utworach przykrywających złożę nie występują miększe kompleksy skał wybitnie uszczelniających, np. ewaporatów;
- w strefie przypowierzchniowej występują porowate i zawodnione skały klastyczne, bogate w żelazo.

Możliwość zarejestrowania anomalii, z reguły bardzo słabej, uzależniona jest ponadto od braku czynników maskujących, wywołujących efekty przekraczające poziom anomalii generowanych przez dyfuzję węglowodorów. Takie zjawiska maskujące powstaną np. w wyniku silnego lateralnego zróżnicowania warstw przypowierzchniowych, obecności uskokiów, wychodni, migracji wód podziemnych itp. Uskoki, powierzchnie strukturalne dochodzące do strefy przypowierzchniowej lub tzw. strefy subwertykalnego rozluźnienia często stanowią drogi intensywnej migracji węglowodorów, a więc w strefie przypowierzchniowej towarzyszą im strefy anomalne, które mogą być znacznie od złoża odsunięte (Bieriezhkin *et al.* 1982, Andrew *et al.* 1991, Saunders *et al.* 1999). Intensywny przepływ wód podziemnych może rozproszyć i przemieścić strefy anomalnych koncentracji węglowodorów i minerałów siarczkowych. Źródłem anomalii potencjałów samoistnych, często o wysokiej amplitudzie, mogą być naturalne procesy elektrochemiczne zachodzące w ośrodku geologicznym, niezwiązane z dyfuzją węglowodorów (Semenov 1980). Zmiany parametrów geofizycznych ośrodka wywołujących anomalie w aktywnych metodach geoelektrycznych, np. metodzie polaryzacji wzbudzonej, mogą być spowodowane czynnikami niezwiązanymi z obecnością złóż węglowodorów (Gennadinik 1983, Oehler & Sternberg 1984). Sternberg (1991) podaje przykład silnej anomalii polaryzacji wzbudzonej zarejestrowanej w strefie złożowej, korelującej się z przypowierzchniową wychodnią okruszczonych wapieni. Anomalie mogą się także wiązać z elementami infrastruktury technicznej eksploatowanego złoża oraz ogólnie – z występującymi technicznymi czynnikami zakłócającymi.

Omówione powyżej czynniki określają sposób postępowania przy zastosowaniu metod geoelektrycznych do bezpośredniej prospekcji węglowodorów. Wykonanie badań należy poprzedzić analizą budowy geologicznej i cech litologicznych nadkładu. Lokalizując punkty pomiarowe, należy unikać potencjalnych źródeł zakłóceń.

Analizując prezentowane w literaturze wyniki badań, można wyodrębnić dwa różne podejścia do zagadnienia bezpośrednich poszukiwań węglowodorów. Pierwsze ukierunkowane jest na rozpoznanie anomalii wywołanych bezpośrednio przez złożę, a więc z reguły wiąże się z metodami o dużym zasięgu głębokościowym. Można powiedzieć, że są to metody bezpośrednie w ścisłym tego słowa znaczeniu. Drugie podejście wiąże się z badaniami anomalii wywołanych przez wpływ akumulacji węglowodorów na strefę przypowierzchniową i pośrednie wnioskowanie dotyczące obecności i parametrów złoża. W tym przypadku określenie „metody pośrednie” jest więc raczej problematyczne.

Do geoelektrycznych metod relatywnie głębokiego zasięgu należy zaliczyć historyczny już system elektromagnetyczny WEGA-D oraz metody głębokich sondowań częstotliwościowych, przede wszystkim metodę magnetotelluryczną, metodę procesów przejściowych oraz metodę polaryzacji wzbudzonej. W badaniach z wykorzystaniem tych metod ewentualne anomalie związane będą z anomalnym rozkładem oporności w strefie złożowej, chociaż wynikają one także z niejednorodności wywołanych obecnością komina dyfuzyjnego. Metoda magnetotelluryczna zapewnia praktycznie nieograniczone, ze względu na możliwość prowadzenia poszukiwań naftowych, zasięg głębokościowy. Mankamentem tej metody jest natomiast rozdzielczość szybko malejąca z głębokością, w wyniku czego obiekty anomalne o niewielkich w porównaniu z głębokością pograżenia rozmiarach stają się niezauważalne. Stąd też metoda ta w wersji pola naturalnego stosowana jest raczej do pośredniego rozpoznania struktury ośrodka geologicznego i jego zróżnicowania litologicznego (Stanley *et al.* 1985, Billings & Thomas 1990, Christopherson 1991, David *et al.* 2002, Stefaniuk *et al.* 2003). W literaturze światowej prezentowane są jednak także próby wykorzystania metody magnetotellurycznej do bezpośredniego wykrywania i rozpoznawania złóż węglowodorów (Beke *et al.* 1991, Csörgei *et al.* 1993, Ingerov *et al.* 2003).

Perspektywiczne w poszukiwaniach naftowych jest wykorzystanie metody magnetotellurycznej ze sztucznym źródłem pola pierwotnego, tj. metody CSMT (*Controlled Source Magnetotellurics*) oraz CSAMT (*Controlled Source Audio-frequency Magnetotellurics*). Sztuczne źródło zapewnia tej metodzie względną odporność na zakłócenia elektromagnetyczne generowane np. przez infrastrukturę techniczną eksploatowanego złoża. Jej wadą jest ograniczony zasięg głębokościowy (w praktyce do 2000 m), pozwalający na bezpośrednio rozpoznawanie złóż położonych na stosunkowo niewielkich głębokościach. Z drugiej strony, w tym zakresie głębokości rozdzielczość metody magnetotellurycznej jest wystarczająca do wykrywania akumulacji węglowodorów o niewielkich nawet rozmiarach (Carlson *et al.* 1981, Beke *et al.* 1991, Csörgei *et al.* 1993, Li & Lin 2010). Należy podkreślić, że w przypadku metody profilowań magnetotellurycznych możliwość zarejestrowania anomalii wiązać należy także z efektem tzw. niejednorodności przypowierzchniowej (Wanian *et al.* 1984). W głębokich badaniach magnetotellurycznych efekt powyższy występuje w charakterze czynnika zaburzającego, w poszukiwaniach bezpośrednich może natomiast odgrywać użyteczną rolę. Efekt niejednorodności przypowierzchniowych jest szczególnie silny w przypadku obecności płytkich stref niskooporowych. Natomiast w strefie komina dyfuzyjnego należy oczekiwać raczej podwyższenia oporności w stosunku do otoczenia.

Ograniczony zasięg głębokościowy metody magnetotellurycznej z kontrolowanym źródłem wiąże się z konfiguracją pola generowanego przez układ nadawczy. W metodzie magnetotellurycznej zakłada się jako pole pierwotne płaską falę elektromagnetyczną propagującą

prostopadle do powierzchni ziemi. Takie warunki zapewnione są w odpowiedniej odległości od układu nadawczego w strefie tzw. pola dalekiego i uzależnione są m.in. od rozkładu oporności w ośrodku geologicznym (Zonge & Huges 1991, Yamashita 2006, Stefaniuk & Wojdyła 2007). Z powodu ograniczeń metody CSAMT opracowane zostały metody badań elektromagnetycznych w mniejszym stopniu uzależnione od konfiguracji układu pomiarowego, w szczególności od odległości dipoli nadawczych i odbiorczych. Funkcjonują one w postaci metod elektromagnetycznych z kontrolowanym źródłem CSEM (*Controlled Source ElectroMagnetics*) (Hughes *et al.* 1984, MacGregor *et al.* 1998, 2006, Andreis & MacGregor 2008). W poszukiwaniach złóż pod dnem morza metody są obecnie stosowane niemal rutynowo. Wykorzystywane są w wersji elektromagnetycznych sondowań częstotliwościowych oraz w wersji profilowej określanej jako profilowanie dna morskiego SBL (*Seabed Logging*) (Eidesmo *et al.* 2002, Ellingsrud *et al.* 2002). W warunkach morskich złoża węglowodorów występuje jako ciało anomalnie wysokooporowe tkwiące w ośrodku o skrajnie niskich opornościach, utworzonym przez słoną wodę morską, drobnoklastyczne osady denne nasycone solanką, uszczelniający kompleks ilasty i kompleks zbiornikowy nasycony zmineralizowaną wodą złożową podścielający strefę nasyconą węglowodorami.

Metoda procesów przejściowych jest w istocie czasowym odpowiednikiem sondowań częstotliwościowych (Bertin *et al.* 1983, Wightman *et al.* 1983). Przedmiotem pomiaru i analizy w tej metodzie jest odpowiedź ośrodka geologicznego na prostokątny impuls prądowy wzbudzony galwanicznie lub indukcyjnie (Klityński & Targosz 2011a, b). Stosowana jest zarówno w wariancie płytkim zorientowanym na rozpoznawanie niejednorodności przypowierzchniowych, jak też w wariancie głębokim (o zasięgu do kilku kilometrów), który pozwala na bezpośrednie rozpoznawanie złoża. Od kilkudziesięciu lat wykorzystywana jest ona w krajach, które należały do Związku Radzieckiego (Spies 1983). Interesujące prace z zastosowaniem procesów przejściowych wykonane zostały także w Australii i w USA (Bertin *et al.* 1983, Wightman *et al.* 1983). Renesans zainteresowania tą metodą przyniosły morskie badania elektromagnetyczne (Edwards 1997, 2005, Ziolkowski *et al.* 2006). Okazało się, że w warunkach morskich po pokonaniu problemów związanych z pomiarami w środowisku wodnym nie pojawiają się problemy techniczne typowe dla badań lądowych związane z oddziaływaniem skomplikowanej morfologii powierzchni terenu. Jak wspomniano powyżej, środowisko wodne oraz dna morskiego tworzy sprzyjający dla metod elektromagnetycznych rozkład oporności.

Szczególną rolę w bezpośredniej prospekcji naftowej należy przyznać metodzie polaryzacji wzbudzonej, będącej wariantem metody procesów przejściowych (Dzwinel 1974, Kamenetsky *et al.* 2010). Początkowo w poszukiwaniach naftowych metoda ta stosowana była wyłącznie do rozpoznawania przypowierzchniowych anomalii generowanych przez migrację węglowodorów, co zdeterminowane było ograniczeniem jej zasięgu głębokościowego (Oehler & Sternberg 1982, 1984, Karus *et al.* 1985, Sternberg 1991). Rozwój techniczny i zastosowanie układu ekwatorialnego pozwoliły na osiągnięcie znacznie większych zasięgów głębokościowych i wykorzystanie zjawiska polaryzacji wzbudzonej do bezpośredniego rozpoznawania złóż (Davydycheva *et al.* 2006, Veeken *et al.* 2009). Szczególnie interesujący i perspektywiczny wydaje się w tym względzie wariant otworowo-powierzchniowy metody polaryzacji wzbudzonej, a także wariant międzyotworowy (Moiseev 2002, Kemna *et al.* 2004).

Bardzo interesujące w kontekście możliwości technicznych metod o małym zasięgu głębokościowym jest pośrednie wykrywanie złóż poprzez rozpoznanie warstwy przypowierzchniowej. Do tego celu stosowane są przede wszystkim metody polaryzacji wzbudzonej i metoda opornościowa, których użyteczność w tym aspekcie potwierdziły badania wykonane w Stanach Zjednoczonych (Sternberg 1991). Analiza charakteru własności elektrycznych strefy przypowierzchniowej komina dyfuzyjnego wskazuje na możliwość wykorzystania płytkich metod indukcyjnych, tj. metody profilowania indukcyjnego (konduktometryczna) i metody VLF (*Very Low Frequency*). Pomiary realizowane tymi metodami są względnie proste i tanie, co szczególnie zachęca do sprawdzenia ich przydatności.

Odrębnej analizy wymaga metoda potencjałów spontanicznych, która jest już „historyczną” w problematyce bezpośrednich poszukiwań złóż węglowodorów. Procesy elektrochemiczne zachodzące w złożu i kominie dyfuzyjnym wskazują na możliwość wystąpienia wyraźnych anomalii naturalnego pola elektrycznego. Badania tych procesów stworzyły podstawy koncepcji bezpośrednich poszukiwań metodami elektromagnetycznymi. Wychodząc z koncepcji polaryzacji elektrycznej złoża, można ją uznać za metodę bezpośrednią, pozwalającą nawet na ocenę parametrów ekonomicznych (Dzwinel 1974, 1975). Mimo obiecujących perspektyw zarysowanych w latach siedemdziesiątych, zastosowania powyższej metody nie zostały rozwinięte. Wynika to z kilku przyczyn. Amplitudy anomalii PS (metoda potencjałów samoistnych) generowane przez migrację węglowodorów są niewielkie, natomiast często obserwuje się anomalie pochodzące od zjawisk innego rodzaju, np. potencjałów filtracyjnych. Uwzględniając jednak naturalne i techniczne utrudnienia, zastosowanie tej metody w powyższym celu za problematyczne uznaje sam jej autor (Dzwinel 1976). Precyzyjne wykonanie pomiarów metodą PS jest poważnym problemem technicznym (Dzwinel 1976, Pirson 1978), stąd też rozwijano raczej tańsze i łatwiejsze w wykonaniu metody rejestracji efektu magnetoelektrycznego. Pomimo powyższych komplikacji nie można wykluczyć, że jest to metoda o dużych możliwościach.

BADANIA W REJONACH ZŁÓŻ KARPACKICH I ZAPADLIKA PRZEDKARPACKIEGO

Eksperymentalne badania elektromagnetyczne w strefach złóż węglowodorów w obszarze karpackim i zapadliska przedkarpackiego wykonane zostały w ramach realizacji projektu badawczo-wdrożeniowego 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*. Wyniki badań przeprowadzonych w północno-zachodniej części złoża ropy naftowej i gazu ziemnego „Grabownica” (Karpaty fliszowe) oraz w rejonie złoża gazu ziemnego „Rudka” (zapadlisko przedkarpackie) można uznać za reprezentatywne.

W skomplikowanym rozkładzie oporności w obrębie fałdu Grabownicy pojawiają się liczne strefy o anomalnie wysokich opornościach (Fig. 16 na wklejce). Strefa udokumentowanego złoża zaznacza się także jako wysokooporowa, przykryta względnie mięszszym kompleksem skał charakteryzujących się niskimi opornościami.

W obrębie formacji klastycznych skałami zbiornikowymi są głównie porowate lub szczelinowate piaskowce, natomiast kompleksy uszczelniające zbudowane są z niskooporowych utworów ilastych lub ilasto-mułowcowych (Stefaniuk & Wojdyła 2009, Stefaniuk 2010a). Prawdopodobieństwo wystąpienia złoża zwiększa więc specyficzny układ względnie wysokooporowych skał zbiornikowych przykrytych niskooporowym kompleksem uszczelniającym. W przypadku wielowarstwowych złóż o niewielkich rozmiarach warstw nasyconych węglowodorami, pograżonych na znacznych głębokościach, rozpoznanie wewnętrznej struktury złoża nie jest w praktyce możliwe z uwagi na małą rozdzielczość metody. Możliwe jest natomiast zarejestrowanie strefy złożowej o relatywnie podwyższonej oporności.

Anomalie rozkładu kąta fazowego polaryzacji wzbudzonej nad złożem skorelowane są wyraźnie z udokumentowaną strefą nasyconą węglowodorami zgodnie z modelem przedstawionym na figurze 7. W strefie złożowej wartość tego parametru jest podwyższona, zaznaczają się też specyficzne minima odzwierciedlające kontury złoża (Fig. 16 na wklejce). Pojawia się ponadto anomalia kąta fazowego dobrze widoczna w ujęciu przestrzennym, sugerująca obecność nieznanego jeszcze złoża położonego na NE od złoża aktualnie eksploatowanego (Stefaniuk 2010b, Stefaniuk *et al.* 2010, Wojdyła *et al.* 2011).

Wyniki badań wykonanych w strefie złoża gazu ziemnego „Rudka” wzdłuż profilu przebiegającego w pobliżu otworu R-9 przedstawia figura 17 (na wklejce).

Złoże „Rudka” znajduje się w obrębie miocenijskiej formacji molasowej zapadliska przedkarpacciego, złożonej z cienkich, układających się naprzemiennie warstw ilasto-mułowcowych i piaskowcowych. Piaskowce są w znacznym stopniu zailone, co znacząco obniża kontrasty opornościowe pomiędzy skałą zbiornikową i uszczelniającą. Dodatkowo piaskowce nasycone gazem tworzą cienkie warstwy, które nie są wykrywalne przy wykorzystaniu powierzchniowych metod geofizycznych. Pomimo tych utrudnień strefa złożowa zaznacza się podwyższoną opornością (Fig. 17). Pojawiają się jednak także dodatkowe strefy o podwyższonej oporności, niektóre z nich mogą się wiązać z akumulacjami gazu. Granice złoża zaznaczają się również na wykresie kąta fazowego polaryzacji wzbudzonej, chociaż podobnie jak w rozkładzie oporności pojawia się dodatkowa anomalia, być może wskazująca strefę perspektywiczną dla dalszych prac poszukiwawczych.

Interesujący jest rozkład anomalii opornościowych i polaryzacji wzbudzonej, obserwowanych w strefie przypowierzchniowej (Fig. 17). Odpowiadają one modelowemu rozkładowi zmian mineralogicznych w obrębie komina dyfuzyjnego (Fig. 7). Według informacji ustnych pracowników PGNiG w Jaśle anomalie powyższe korelują się jednak ze zmianami litofacjalnymi, związanymi z pogrzebanymi korytami rzecznyymi, a więc niekoniecznie należy je wiązać z migracjami węglowodorów.

PODSUMOWANIE

Metody geoelektryczne wykorzystywane są do pośredniego poszukiwania złóż węglowodorów głównie poprzez rozpoznanie strukturalne i litologiczne oraz do bezpośredniego wykrywania i rozpoznawania tych złóż. Stosuje się je w fazie wstępnego rozpoznania regionalnego lub jako metody wspomagające badania sejsmiczne. Nie są one w zasadzie stosowane rutynowo, prowadzone są natomiast liczne badania eksperymentalne.

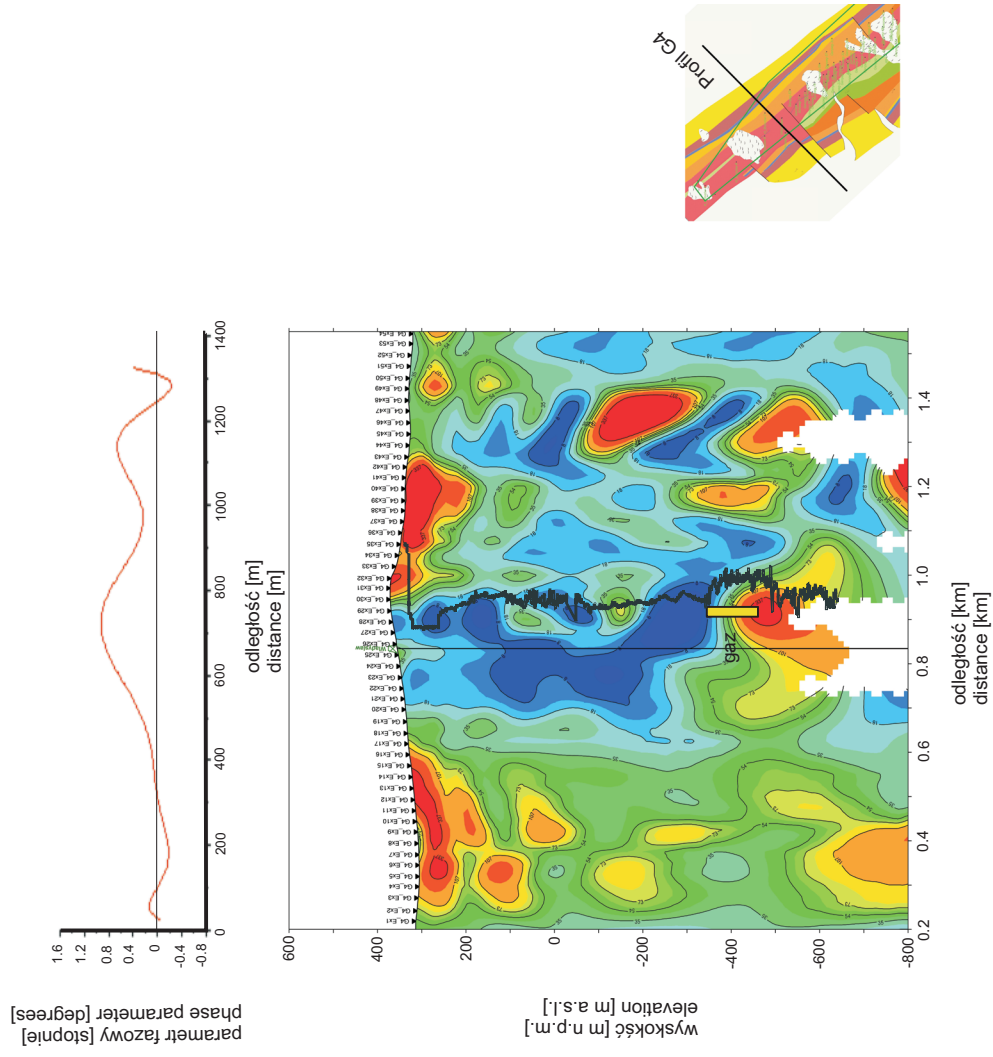


Fig. 16. Rozkład oporności w przekroju złoża ropy naftowej „Grabownica” zestawiony z wykresem parametru fazowego polaryzacji wzbudzonej

Fig. 16. Resistivity cross-section trough the “Grabownica” oil field and graph of phase parameter of induced polarization

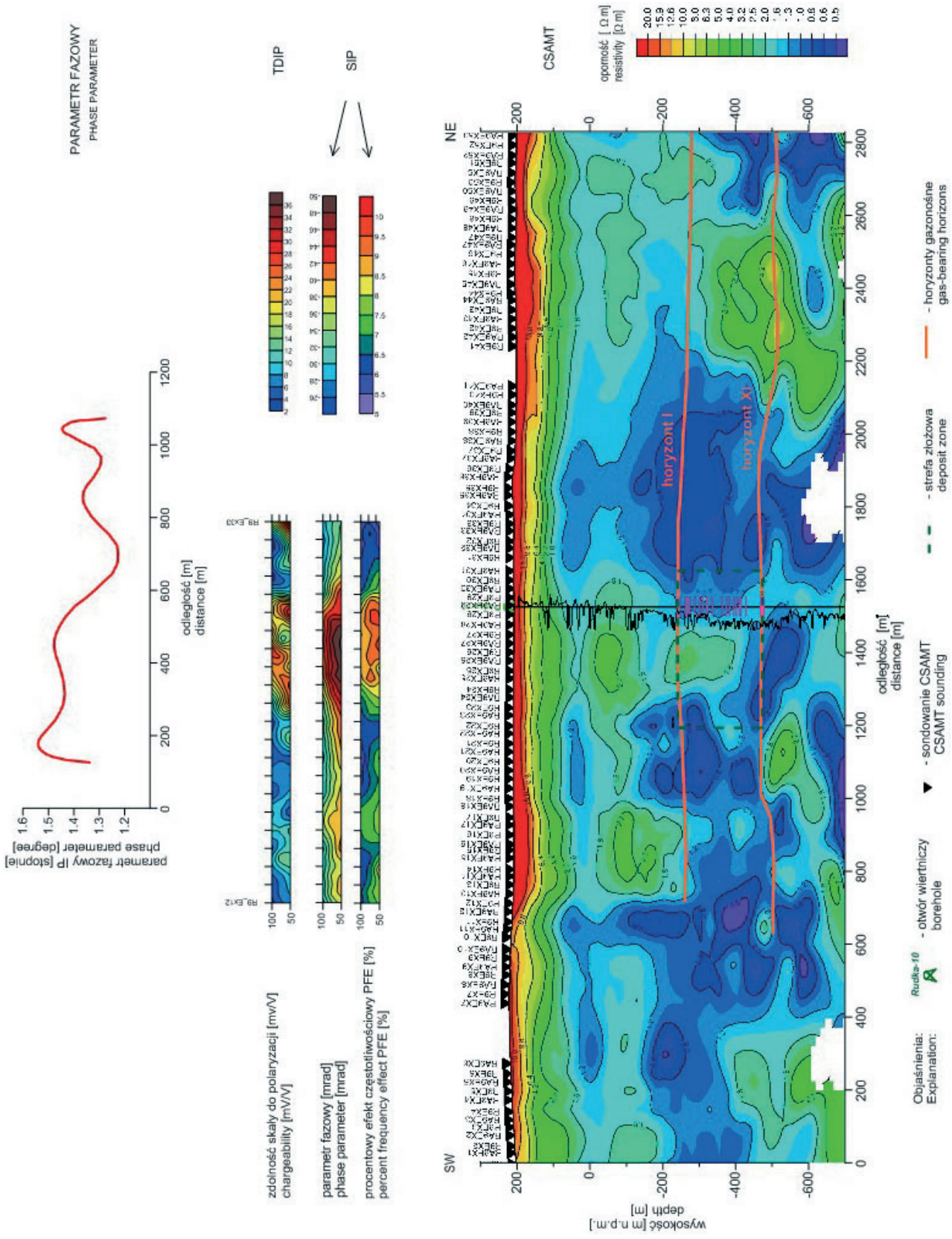


Fig. 17. Rozkład oporności w przekroju złoża gazu ziemnego „Rudka” zestawiony z rozkładem parametrów polaryzacji wzbudzonej (wg Stefaniuka *et al.* 2011). Objasnienia: SIP – polaryzacja wzbudzona w wersji spektralnej, TDIP – polaryzacja wzbudzona w wersji czasowej, CSAMT – metoda audiomagnetyczna z kontrolowanym źródłem

Fig. 17. Resistivity cross-section through the “Rudka” gas field versus distribution of parameters of induced polarization (after Stefaniuk *et al.* 2011). Explanations: SIP – Spectral Induced Polarization; TDIP – Time Domain Induced Polarization, CSAMT – Controlled Source Audiofrequency Magnetotellurics

Nasycenie węglowodorami powoduje podwyższenie oporności ośrodka geologicznego, natomiast nasycenie wodami złożowymi, szczególnie silnie zasolonymi, radykalnie obniża wartości tego parametru. W przypadku dużych złóż zalegających względnie płytko, a także strefą zanieczyszczenia wód gruntowych przez węglowodory metody elektromagnetyczne próbuje się wykorzystywać do kartowania kontaktu woda – ropa naftowa lub woda – gaz ziemny oraz do ogólnego rozpoznania złoża. W prospekcji naftowej wykorzystywane są także anomalie pojawiające się w strefie przypowierzchniowej związane ze zmianami geochemicznymi w strefie tzw. komina dyfuzyjnego tworzącego się nad złożami ropy naftowej i gazu ziemnego. W górnej strefie tego komina wytracają się związki żelaza (piryt) powodujące obniżenie oporności i podwyższenie stałej dielektrycznej, a przede wszystkim współczynnika polaryzacji wzbudzonej.

W poszukiwaniach naftowych wykorzystywane są metody: magnetotelluryczna w wariantach pola naturalnego i wzbudzonego sztucznie, polaryzacji wzbudzonej, procesów przejściowych, a nawet elektrooporowa. W Polsce wykonywane były badania zarówno zjawisk zachodzących w obrębie komina dyfuzyjnego, jak też bezpośredniej strefy złożowej z wykorzystaniem elektromagnetycznego systemu częstotliwościowego VEGA-D, opracowanego w latach 70. ubiegłego wieku przez zespół prof. J. Dzwiniela z Instytutu Naftowego w Krakowie.

Dynamiczny rozwój zastosowań metod elektromagnetycznych obserwuje się w morskiej prospekcji naftowej. Sprzyjają tej tendencji specyficzne warunki występowania złóż węglodorów, jako ciała wysokooporowego w niskooporowym otoczeniu wody morskiej, utworów ilastych i porowatych piaskowców nasyconych silnie zmineralizowaną wodą złożową. Istotny jest także z pewnością aspekt ekonomiczny, tzn. relatywnie wysoki koszt podmorskich prac wiertniczych powodujący konieczność obniżenia ryzyka lokalizacji otworów negatywnych. Badania elektromagnetyczne wykartowanych sejsmicznych pułapek złożowych z zastosowaniem niezależnego zespołu parametrów charakteryzujących ośrodek geologiczny dostarczają dodatkowych informacji przy ustalaniu rankingu obiektów przeznaczonych do rozwiercenia. Szczególnie istotna jest rola badań elektromagnetycznych w potwierdzeniu występowania akumulacji w tzw. pułapkach niestrukturalnych, których rozpoznawanie sejsmiczne jest szczególnie utrudnione.

W kontekście aktualnych uwarunkowań i problemów prospekcji węglodorów jako perspektywiczne należy traktować badania z wykorzystaniem różnorodnych wariantów sondowań (metod) częstotliwościowych oraz metody polaryzacji wzbudzonej. Należy oczekiwać szerszego stosowania metod otworowo-powierzchniowych i międzyotworowych, głównie polaryzacji wzbudzonej i procesów przejściowych, do bezpośredniego rozpoznawania złóż.

Podsumowując powyższą analizę, należy podkreślić, że nie można oczekiwać szybkich i łatwych sukcesów w wykorzystaniu metod geoelektrycznych do tzw. bezpośredniej prospekcji złóż węglodorów. Efekty anomalne związane z obecnością złóż są raczej słabe i trudne do wydzielenia z tła anomalii generowanych przez ośrodek geologiczny i sztuczne zakłócenia elektromagnetyczne. Anomalie przypowierzchniowe nie zawsze będą się pojawiały, natomiast niewielkie rozmiary złoża w stosunku do głębokości jego pograżenia ograniczają prawdopodobieństwo zarejestrowania efektów bezpośrednich przez badania powierzchniowe. W związku z powyższym należy wykonywać raczej zdjęcia powierzchniowe,

co związane jest ze zwiększonymi nakładami finansowymi. Istotne jest także kompleksowe zastosowanie kilku metod geofizycznych, geochemicznych i analizy budowy geologicznej. Szczególnie perspektywiczne wydaje się wykorzystanie metod elektromagnetycznych łącznie z sejsmiką refleksyjną.

Artykuł opracowany został na podstawie wyników badań wykonanych 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 średniozasiegowych badań elektromagnetycznych” realizowanego przez Akademię Górniczo-Hutniczą w Krakowie, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

- Andreis D. & MacGregor L., 2008. Controlled-source electromagnetic sounding in shallow water: Principles and applications. *Geophysics*, 73, 1, F21–F32.
- Andrew J.A., Edwards D.M., Graf J.G. & Wold R.J., 1991. Empirical observations relating near-surface magnetic anomalies to high-frequency seismic data and Landsat data in eastern Sheridan County, Montana. *Geophysics*, 36, 10, 1533–1570.
- Beamish D. & Travassos J.M., 1992. Magnetotelluric imaging of basalt-covered sediments. *First Break*, 10, 345–357.
- Bertin J., Farabolini W., Cole R. & Raudot M., 1983. The transit method applied to hydrocarbon exploration: A statistical study of its results. *Australian Society of Exploration Geophysicist Bulletin*, 14, 189–190.
- Beke B., Csörgei J., Lada F., Formanne-Gulyas C., Nagy T. & Nagy Z., 1991. Non-Seismic Methods Used to Delineate Hydrocarbon Deposits in Hungary. *AAPG International Conference and Exhibition*, Sept. 29–Oct. 2, 1991, 1–21.
- Bieriezkin W.M., Loszakow A.I. & Nikolajev M.I., 1982. Primenenie magnitorazvedki dla poiskov mestorozdenij nefti i gaza. *Prikladnaja geofizika*, 3, 38–49.
- Billings A.J. & Thomas J.H., 1990. The use and limitations of non-seismic geophysics in the Papuan Trust Belt. *Proceedings of the First PNG Petroleum Convention, Port Moresby*, 51–62.
- Boer E. den, Eikelboom J., Driel P. van & Watts D., 2000. Resistivity imaging of shallow salt with magnetotellurics as an aid to prestack depth migration. *First Break*, 18, 1, 19–26.
- Carlson N.R., Hughes L.J. & Zonge K.L., 1981. Hydrocarbon exploration using induced polarization, apparent resistivity, and electromagnetic scattering. *Technical Papers, 51st Annual International Society of Exploration Geophysicist Meeting and Exposition*, 3, 1339–1358.
- Christopherson K.R., 1991. Application of magnetotellurics to petroleum exploration in Papua New Guinea: a model for frontier areas. *The Leading Edge*, 10, 4, 21–27.

- Cole K.S. & Cole R.H., 1941. Dispersion and absorption in dielectrics. *Journal of Chemical Physics*, 6, 42–52.
- Constable S.C., Orange A., Hoversten G.M. & Morrison H.F., 1998. Marine magnetotellurics for petroleum exploration. Part I: A sea-floor equipment system. *Geophysics*, 63, 816–825.
- Csörgei J., Kovácsvölgyi S. & Sörös L., 1993. Non-Seismic Methods to Delineate Hydrocarbon Deposits of Hungary. *55th EAGE Meeting and Technical Exhibition, Stavanger, Norway, 7–11 June 1993*, 1–9.
- David C., Ioan G., Ionescu L. & Lacatusu B., 2002. A detailed magnetotelluric survey for deep gas Structure Frasin, Romania. *EAGE 64th Conference & Exhibition – Florence Italy, 27–30 May 2002*, E-49, 1–4.
- Davydycheva S., Rykhlini N. & Legeido P., 2006. Electrical-prospecting method for hydrocarbon search using the induced-polarization effect. *Geophysics*, 71, 4, G179–G189.
- Donovan T.J., Hendricks J.D., Roberts A.A. & Eliason P.T., 1984. Low-altitude aeromagnetic reconnaissance for petroleum in the Arctic National Wildlife Refuge, Alaska. *Geophysics*, 49, 8, 1338–1333.
- Dzwinel J., 1973. Bezpośrednie poszukiwania złóż węglowodorów w oparciu o powierzchniowe pomiary efektu ich naturalnej polaryzacji elektrycznej. *Nafta*, 29, 3, 193–193.
- Dzwinel J., 1974. Geofizyczne podstawy bezpośrednich poszukiwań naftowych. *Geofizyka i Geologia Naftowa*, 9–12, 241–270.
- Dzwinel J., 1975. Bezpośrednie poszukiwania złóż węglowodorów w oparciu o powierzchniowe pomiary efektu ich naturalnej polaryzacji elektrycznej. *Nafta*, 31, 5, 193–195.
- Dzwinel J., 1976. Konieczność weryfikacji hipotezy S.J. Pirsona o naturze polaryzacji elektrycznej złóż węglowodorów w aspekcie bezpośrednich poszukiwań. *Nafta*, 32, 12, 401–403.
- Edwards N., 1997. On the resource evaluation of Marine gas hydrate deposits using sea-floor transient electric dipole-dipole methods. *Geophysics*, 62, 6763–74.
- Edwards N., 2005. Marine controlled source electromagnetics. Principles, methodologies, future commercial applications. *Surveys in Geophysics*, 36, 675–700.
- Eidesmo T., Ellingsrud S., MacGregor M.C., Constable S., Sinha M.C., Johansen S., Kong F.N. & Westerdahl H., 2002. Sea bed logging (SBL), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deepwater areas. *First Break*, 20, 144–152.
- Ellingsrud S., Eidesmo T., Johansen S., Sinha M.C., MacGregor M.C. & Constable S., 2002. Remote sensing of hydrocarbon layers by seabed logging (SBL). Results from a cruise offshore Angola. *The Leading Edge*, 21, 972–982.
- Gennadinik B.J., 1985. *Teoria javlenia vyzvannoj polarizacii*. Nauka, Novosibirsk, 1–280.
- Hoversten G.M., 1996. Papua New Guinea MT: looking where seismic is blind. *Geophysical Prospecting*, 44, 6, 935–961.

- Hoversten G.M., Morrison H.F. & Constable S.C., 1998. Marine magnetotellurics for petroleum exploration, Part II: Numerical analysis of subsalt resolution. *Geophysics*, 63, 826–840.
- Hughes L.J., Carlson N.R. & Ostrander A.G., 1984. Application of CSAMT in mapping structure and alteration associated with petroleum. Technical program, abstracts and biographies. *54th Annual International Society of Exploration Geophysicists Meeting and Explosion*, 102–104.
- Ingerov A., Fox L., Avram T.L., Basov M.D. & Kocherov A.B., 2003. Resistivity signature of hydrocarbon deposits: Mt surveys in Western Uzbekistan. *EAGE 65th Conference & Exhibition, Stavanger, Norway, 2–5 June 2003*, 1–4.
- Kamenetsky F.M., Stettler E.H. & Trigubovich G.M., 2010. *Transient Geo-Electromagnetics*. Ludwig-Maximilian-University of Munich, Department of the Earth and Environmental Sciences, Section Geophysics, Munich, 1–295.
- Karus E.W., Kuznetsov L.O., Kirichek M.A. & Petukhov A.V., 1985. Direct Prospecting of Gas-Oil Deposits Including Complex of Geophysical Techniques. *30th International Geophysical Symposium, Moscow, September 23–28 1985, Proceedings, Part 1*, 37–46.
- Keller G.V. & Frischknecht F.C., 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press, Oxford, 1–519.
- Kemna A., Binley A. & Slater L.D., 2004. Crosshole IP imaging for engineering and environmental applications. *Geophysics*, 69, 97–107.
- Khan S.D. & Jacobson S., 2008. Remote sensing and geochemistry for detecting hydrocarbon microseepages. *Geological Society of America Bulletin*, 120, 1/2, 96–105.
- Klityński W. & Targosz P., 2011a. Podstawy metody procesów przejściowych i jej możliwości zastosowania w wykrywaniu złóż węglowodorów. *Geologia (kwartalnik AGH)*, 37, 1, 89–111.
- Klityński W. & Targosz P., 2011b. Zastosowanie metody procesów przejściowych do wykrywania złóż węglowodorów w rejonie Grabownicy Starzeńskiej – Humnisk – Brzozowa. *Geologia (kwartalnik AGH)*, 37, 1, 141–156.
- Koblański A., 1994. Mechanizmy generacji anomalii magnetycznych nad złożami węglowodorów – zarys problematyki. *Technika Poszukiwań Geologicznych. Geosynoptyka i Geotermia*, 2–3, 33–37.
- Li Y-L. & Lin C-M., 2010. Exploration methods for late Quaternary shallow biogenic gas reservoir in the Hangzhou Bay area, eastern China. *AAPG Bulletin*, 94, 11, 1741–1759.
- MacGregor L.M., Constable S.C. & Sinha M.C., 1998. The RAMESSES experiment III. Controlled source electromagnetic sounding of the Reykjanes Ridge at 57° 45'N. *Geophysical Journal International*, 135, 773–789.
- MacGregor L.M., Andreis D., Tomlinson J. & Barker N., 2006. Controlled source electromagnetic imaging on the Nuggets-1 reservoir. *The Leading Edge*, 25, 1707–1713.
- Meju M.A., 2000. Geoelectromagnetic characterization of natural resource targets: genetic models, correspondence principles and case studies. *15th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Cabo Frio, Brazil*, 180–219.

- Moiseev V.S., 2002. *Ground-well electro-prospecting while contouring hydrocarbon deposits using cased well*. Nedra, Novosibirsk.
- Natkaniec D., 1977. Dwufazowy model skały zbiornikowej w polu elektromagnetycznym niskich częstotliwości. *Nafta*, 10, 339–346.
- Olhoeft G.R., 1985. Low-frequency electrical properties. *Geophysics*, 50, 2492–2503.
- Oehler D.Z. & Sternberg B.K., 1982. Induced polarization for hydrocarbon exploration: Geochemical/geological interpretation. Technical program, abstracts and biographies, *52nd Annual International Society of Exploration Geophysicists Meeting and Explosion, Dallas*, 445–448.
- Oehler D.Z. & Sternberg B.K., 1984. Seepage-induced anomalies “false” anomalies and implications for electrical prospecting. *AAPG Bulletin*, 68, 1121–1145.
- Pelton W.H., Ward P.C., Hallof W.R. & Nelson P.H., 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 43, 588–609.
- Pirson S.J., 1973. Advantages and limitations of direct oil-finding methods. *World Oil*, 176, 3 (part 1), 63–66.
- Pirson S.J., 1978. Physical and chemical signals around oil and gas traps. *The Log Analyst*, XIX, 18–23.
- Prieto C., Perkins C. & Berkman E., 1985. Columbia River Basalt Plateau – An integrated approach to interpretation of basalt-covered areas. *Geophysics*, 50, 2709–2719.
- Saunders D.F., Burson K.R. & Thomson C.K., 1999. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations. *AAPG Bulletin*, 83, 170–185.
- Schlumberger C., 1920. *Etude sur la prospection électrique du sous-sol*. Gauthier-Villars.
- Semenov A.S., 1980. *Elektroravedka metodom estetsvennogo elektriceskogo polija*. Nedra, Leningrad.
- Spies B.R., 1983. Recent developments in the use of surface electrical methods for oil and gas exploration in the Soviet Union. *Geophysics*, 48, 1102–1112.
- Srnka L.J., 2007. Illuminating Reservoirs with Electromagnetics. *EGM 2007 Workshop Innovation in EM, Grav and Mag Methods a new Perspective for Exploration, Capri, Italy, April 15–18, 2007*, 1–4.
- Stanley W.D., Saad A.R. & Ohofugi W., 1985. Regional magnetotelluric surveys in hydrocarbon exploration, Parana Basin, Brasil. *AAPG Bulletin*, 69(3), 346–360.
- Stefaniuk M., 2001. Główne elementy strukturalne podłoża wschodniej części Karpat polskich w świetle badań magnetotellurycznych. *Geologia (kwartalnik AGH)*, 27, 1, 127–159.
- Stefaniuk M., 2003. Regionalne badania magnetotelluryczne w polskich Karpatach wschodnich. *Geologia (kwartalnik AGH)*, 26, 3–4, 131–168.
- Stefaniuk M., 2005. Metoda magnetotelluryczna w prospekcji naftowej. W: Górecki W., Sowizdżał A. (red.), Problems of the utilization of geothermal waters and energy in China and in Poland: investigation of geothermal, hydrogeological and drilling technology and equipment, *Seminaria Naukowe Zakładu Surowców Energetycznych AGH – Kraków*, 125–126.

- Stefaniuk M., 2010a. The elements of the oil system in the eastern part of Polish Carpathians in the light of results of regional magnetotelluric survey. *20th IAGA WG 1.2 Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Giza, Egypt, September 18–24 2010*, 1–2.
- Stefaniuk M., 2010b. Anomalne efekty elektromagnetyczne towarzyszące złożom węglowodorów i ich wykorzystanie w prospekcji naftowej. W: Stefaniuk M. (red.), *Inicjatywa technologiczna I: „Opracowanie nowatorskich metod wykrywania złóż węglowodorów oraz rozpoznawania struktury i zmienności złóż w trakcie ich eksploatacji za pomocą kompleksu głębokich i średniozasięgowych badań elektromagnetycznych”, Iwkowa 2010* (materiały seminaryjne), 9–10.
- Stefaniuk M. & Ślącza A., 2003. Structural Interpretation of Semi-Detailed Magnetotelluric Survey in Kamienica – Gogołów Area in the Polish Outer Carpathians. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 73, 219–231.
- Stefaniuk M. & Wojdyła M., 2007. Badania magnetotelluryczne z zastosowaniem sztucznego źródła pola pierwotnego. *Biuletyn Informacyjny PBG Geofizyka*, 2, 7–23.
- Stefaniuk M. & Wojdyła M., 2009. Rozpoznawanie elementów systemu naftowego w Karpatach z wykorzystaniem metody magnetotellurycznej. *Konferencja Naukowo-Techniczna „Ropa i gaz a skały klastyczne Polski”, Czarna 17–20 marca 2009*, 55–56.
- 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., Czerwiński T., Klityński W. & Wojdyła M., 2008. Zastosowanie metody magnetotellurycznych profilowań ciągłych w badaniach strukturalnych. *Geologia* (kwartalnik AGH), 34, 1, 43–69.
- 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., Figuła J., Wojdyła M., Sada M. z zespołem, 2011. *Sprawozdanie z eksperymentalnych badań elektromagnetycznych w strefach struktury złożowej „Rudka” we wschodniej części zapadliska przedkarpacciego. Opracowanie końcowe w ramach Inicjatywy Technologicznej I. Projekt naukowo-badawczy nr 13102 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”, Zadanie 7, Kraków 2011*.
- Sternberg B.K., 1991. A review of some experience with the induced-polarization resistivity method for hydrocarbon surveys: Successes and limitations. *Geophysics*, 56, 10, 1522–1532
- 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.

- Veeken P.C.H., Legeydo P.J. & Kudryavceva E.O., 2010. Replay to Discussion. *Geophysics*, 75, 1, X2–X4.
- Wanian L.L., Debabov A.G. & Judin M.N., 1984. *Interpretacja danych magnitotellurycznych zondirovanij neodnorodnych sred.* Nedra, Moskva.
- Wightman W.E., Kaufman A.A. & Hoeskra P., 1983. Mapping gas-water contacts in shallow producing formations with transient EM. *Abstracts of 1983 Society of Exploration Geophysists International Meeting*, 59–60.
- Wilt M. & Allumbaugh D., 1998. Electromagnetic methods for development and production: State of the art. *The Leading Edge*, 17, 487–491.
- Wojdyła M., Florek R., Stefaniuk M. & Sito Ł., 2010. Interpretacja danych elektromagnetycznych w zachodniej strefie zapadliska przedkarpackiego. W: Stefaniuk M. (red.), *Inicjatywa technologiczna I: „Opracowanie nowatorskich metod wykrywania złóż węglowodorów oraz rozpoznawania struktury i zmienności złóż w trakcie ich eksploatacji za pomocą kompleksu głębokich i średniozasięgowych badań elektromagnetycznych”*, Iwkowa 2010 (materiały seminaryjne), 23–24.
- Wojdyła M., Stefaniuk M., Sada M. & Sito Ł., 2011. Metoda polaryzacji wzbudzonej w prospekcji złóż węglowodorów. *Geologia* (kwartalnik AGH), 37, 1, 63–88.
- Yamashita M., 2006. *Controlled Source Audio-Frequency Magnetotellurics (CSAMT)*. Phoenix Geophysics Limited (mat. niepubl.).
- Ziolkowski A., Hall G., Wright D., Carson R., Peppe O., Tooth D., Mackay J. & Chorley P., 2006. Shallow marine test of MTEM Method. *76th Annual International Meeting. SEG, Expanded Abstracts*, 729–734.
- Zonge K.L. & Hughes L.J., 1991. Controlled source audio-frequency magnetotellurics. W: Nabighian M.N. (Ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, 2, Society of Exploration Geophysicists, 713–809.

Summary

Saturation of a geological medium with hydrocarbons causes specific changes in its physical properties. The saturated zones generate anomalies in physical parameters distribution and measured geophysical fields thus allowing, to some extent, discovering the deposit and even recognizing its range, structure and changeability of deposit parameters. From the point of view of electromagnetic methods, deposit complexes are characterized by increased resistivity of geological medium by 1–4 orders of magnitude (Figs 1, 2, 4). Particularly, a distinct contrast appears at the lower boundary of deposit, between reservoir rock saturated with highly mineralized water and saturated with oil or natural gas as well as at the upper boundary that is covered by low-resistivity, sealing clayey rocks (Figs 3, 5). Moreover, a contrast of environment's ability to electric polarization induced by electric current flow appears at the boundary between hydrocarbons and formation water (Fig. 6). As a result of the contrast, there appear anomalous distribution of polarization parameters; in particular, anomaly of so-called phase parameter of polarization that marks itself at deposit contour zone (Fig. 7). Moreover, spontaneous electric processes in the geological

medium can lead to electric charges that divide in the vicinity of lithological boundaries, thus generating monopolar charging of zone saturated with hydrocarbons (Fig. 8).

The direct reflection of deposit in surface anomalies depends on its size and depth of burial hence the effects from objects of small size buried to a significant depth disappear among anomalies generated by petrophysical differentiation of the overburden. An indirect indicator of hydrocarbon deposit is the near-surface zone of mineralogical changes connected with diffusion of hydrocarbons from the deposit zone to the ground surface (Figs 9, 10). As a result of the changes, a zone of scattered sulfide mineralization appears in the diffusion chimney, which modifies mainly magnetic properties of geological medium and its ability to electric polarization (Fig. 11). The epigenetic calcite crystallization inside pore space can also be stimulated by hydrocarbons that can lead to increased resistivity of near surface layer (Figs 12, 13). According to some concepts, the excess of negative charges can appear in the zone of migration chimney as a result of hydrocarbon migration (Fig. 14). The existing negatively charged zone generates electric current in the centre of the diffusion chimney (Fig. 15). The current generate then so-called electrotelluric and magnetotelluric anomalies that can be measured on the earth surface. Taking into account anomalous distribution of electromagnetic parameters connected with hydrocarbon deposit including near surface zone of alteration, the magnetotelluric method, induced polarization method, transient electromagnetic method and frequency sounding method could be effectively used for direct or indirect prospection and recognition of oil and gas fields.

The electromagnetic investigations, of which some results are presented in the paper, were made in zones of the Grabownica and Łodyna oil fields located in the Carpathian flysch structures and in the zone of the Rudka gas field in the Carpathian Foredeep. Those deposits are relatively shallow and despite their small size they mark in interpreted geophysical parameters. Example of resistivity cross-section based on interpretation of magnetotelluric data and distribution of phase parameter (phase angle) of induced polarization cutting the Grabownica field zone is presented in figure 16. A good correlation between a hydrocarbon-saturated zone interpreted from borehole data and resistivity anomalies as well as with a low-resistivity sealing complex can be observed. However, a few more zones of the section with relatively high resistivity are observed, which are probably generated by lithological differentiation. Some of those zones covered by low-resistivity complex could be considered as prospective for hydrocarbon accumulation. Induced polarization anomalies are correlated with hydrocarbon contour according to model presented in figure 7. The additional anomaly suggesting presence of an unknown deposit can be also seen.

Resistivity contrast in the Rudka gas field located in molasse-type sediments of the Carpathian Foredeep is small, however increased resistivity connected with documented field zone is observed (Fig. 17). Induced polarization anomalies correlate with a hydrocarbon-saturated zone and minima of phase parameter, which point to field contours, can be seen. The obtained results suggest that a suite of electromagnetic methods can be effectively applied to direct petroleum prospecting. Particularly, zones saturated with hydrocarbons which mark as relatively high-resistivity and specific anomalies of phase parameter of polarization can be visible in deposit contours.