

PRÓBA WYKORZYSTANIA METODY POTENCJAŁÓW WZBUDZONYCH DO WYKRYWANIA ZANIECZYSZCZEŃ WĘGLOWODORAMI NA OBSZARZE POSTGLACJALNYM

**Application of induced polarization method
for hydrocarbons detection in the contaminated postglacial area**

**Bogdan ŻOGAŁA, Maciej MENDECKI,
Jolanta PIERWOŁA & Waclaw M. ZUBEREK**

*Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi,
Katedra Geologii Stosowanej;
ul. Będzińska 60, 40-200 Sosnowiec;
e-mail: bogdan.zogala@us.edu.pl, m.mendecki@gmail.com,
jolanta.pierwola@us.edu.pl, waclaw.zuberek@us.edu.pl*

Abstract: Oil contaminations of soils are connected with human activity, for instance military activity. Organic pollution finding is one of environmental protection problems. Our field investigation was carried out to localize oil contaminations with induced polarization method (IP). The studied area is situated in post-Soviet military fuel base. The area is covered by postglacial sediments. Part of selected experimental area was submitted to bioremediation process. IP measurements indicated the relationship between bioremediation area and increase of chargeability effect. Two types of electrodes were used for measurements: stainless steel and non-polarizable ones. The survey results confirmed more accuracy of non-polarizable electrodes for postglacial area conditions. This method could be used to monitor efficacy of bioremediation process of hydrocarbons contaminated soils as well.

Key words: postglacial area, oil contamination, bioremediation, induced polarization, chargeability

Słowa kluczowe: obszar postglacjalny, skażenie węglowodorami, bioremediacja, polaryzacja wzbudzona, ładowność

PODSTAWY ZJAWISKA POTENCJAŁÓW WZBUDZONYCH

Występowanie potencjałów wzbudzonych, nazywanych również zjawiskiem polaryzacji indukowanej (IP), jest obserwowane jako zanik potencjału odpowiedzi ośrodka geologicznego wywołanej przez zewnętrzne pole elektryczne. Relaksacja tego efektu może zostać zmierzona i opisana w domenie czasu oraz domenie częstotliwości (Schön 1996). W pierwszym przybliżeniu zjawisko polaryzacji indukowanej, z jego narastaniem i zanikaniem w czasie, jest analo-

giczne do ładowania i rozładowania kondensatora, jednak krzywe rozładowania do stanu równowagi elektrycznej mają różne kształty (Fig. 1). Dla skał mają one charakter funkcji logarytmicznej i maleją łagodniej niż eksponencjalne krzywe spadku napięcia w układzie R-C (Telford *et al.* 1993).

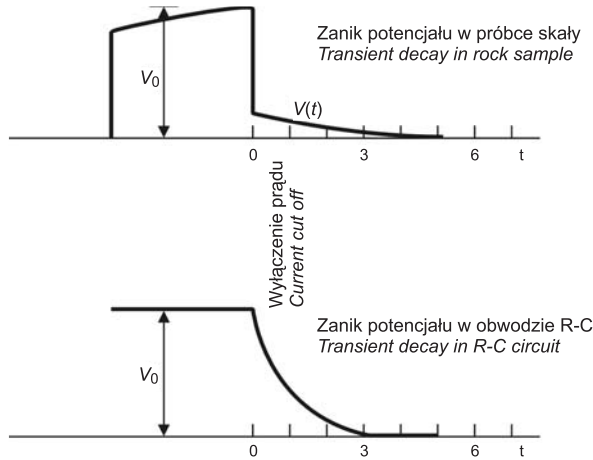


Fig. 1. Porównanie krzywych zaniku potencjałów wzbudzonych z układem R-C (Telford *et al.* 1990)

Fig. 1. Comparison of IP and R-C decay curves (Telford *et al.* 1990)

W ośrodku skalnym pojawienie się polaryzacji indukowanej jest związane ze zjawiskami elektrochemicznymi. W zależności od minerałów występujących w szkieletce skalnym i przestrzeni porowej dominują dwa efekty: polaryzacja elektrodowa, związana z minerałami rudnymi oraz polaryzacja membranowa, występująca w obecności minerałów ilastych. Zjawisko polaryzacji elektrodowej zachodzi, gdy granica faz minerał kruszcowy – roztwór glebowy znajduje się pod wpływem zewnętrznego źródła prądu. Istniejące pole elektryczne wymusza przepływ prądu przez granicę faz i inicjuje szereg zjawisk elektrycznych, między innymi powstanie naturalnych oporników i kondensatorów oraz zjawiska nadwoltażu, czyli wystąpienia nadmiaru potencjału (Telford *et al.* 1993). Z kolei polaryzacja membranowa pojawia się w obecności minerałów ilastych, które generują na swojej powierzchni wypadkowy ładunek ujemny. Wokół ziarna minerału ilastego gromadzi się „chmura” jonów dodatnich, tworząca system minerał – elektrolit, zwany warstwą podwójną (Ward 1997). Układ taki funkcjonuje analogicznie do membrany selektywnie filtrującej cząstki. Pod wpływem pola elektrostatycznego prąd jonowy migruje przez „membranę”, jednakże przenikają ją tylko kationy, natomiast aniony są zatrzymywane i akumulowane, w wyniku czego gromadzi się dodatkowy ładunek elektryczny. Wyłączenie prądu powoduje powrót jonów do stanu równowagi elektrostatycznej pod wpływem sił dyfuzyjnych, co przejawia się zarejestrowaniem przez aparaturę pomiarową krzywej rozładowania (Sumner 1976).

Gdy pomiar zjawiska polaryzacji indukowanej jest realizowany w kilku oknach czasowych, można zaobserwować kształt krzywej rozładowania $M=f(t)$ [ms] lub kształt krzywej zaniku potencjału wzbudzonego w funkcji czasu $V=f(t)$ [mV]. W celu odtworzenia tych krzywych należy korzystać z danych nieprzetworzonych (ładowność pozorna).

Wyniki odpowiedzi IP można także przedstawiać w formie krzywej profilowania wzdłuż całego profilu pomiarowego (Vanhalo 1997, Dahlin *et al.* 2002). Dane pomiarowe uzyskiwane z systemów obrazowania, mogą być poddawane inwersji i przedstawiane w formie przekrojów 2D.

CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ

Obszar badań znajduje się na terenie byłej bazy paliwowej w Bornem-Sulinowie. Miasto wraz z bazą zlokalizowane jest nad jeziorem Pile należącym do Pojezierza Szczecińskiego. Geologicznie Borne-Sulinowo usytuowane jest w obrębie wału kujawsko-pomorskiego. Osady kenozoiczne zalegają tu na skonsolidowanym podłożu mezozoicznym, będącym częścią antyklinorium środkowopolskiego. W skład pokrywy kenozoicznej wchodzi mułowce i piaskowce oligoceńskie oraz gliny, piaski i muły miocenijskie osiągające miąższości do 160 m, a także osady plejstocenu i holocenu o zmiennej miąższości wahającej się od 60 do 200 m. Plejstocenijski materiał skalny zdeponowany w tym obszarze jest pochodzenia lodowcowego (głównie gliny zwałowe) oraz fluwioglacjalnego (piaski, żwiry) i limnoglacjalnego (piaski, muły). Najmłodsze osady powstały przy udziale rzek, jezior oraz biosfery (Żogała *et al.* 2008).

METODYKA POMIAROWA

Pole badawcze wytyczono na sandrze Piławy usytuowanym na południe od jeziora Pile. Powierzchnia sandru obniża się w kierunku południowym na długości 8÷9 km. Miąższość piasków i żwirów dochodzi tu do 10÷20 m. Wewnątrz stożka sandru występują wytopione obniżenia o szerokościach 100÷200 m, które wypełniają osady gliniaste i muły (Żogała *et al.* 2008).

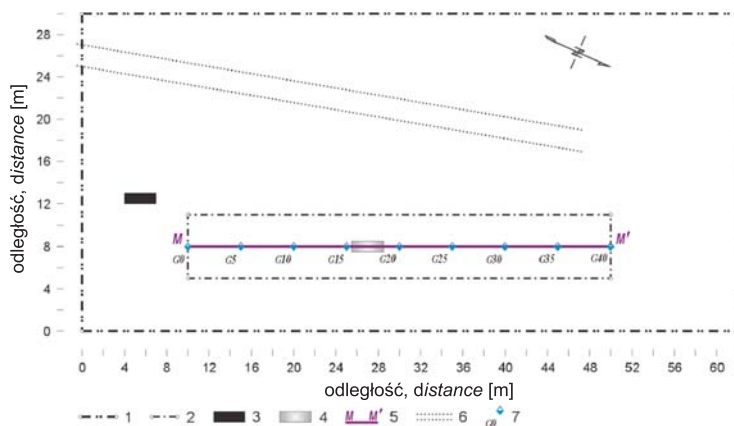


Fig. 2. Mapa sytuacyjna pola badawczego (Żogała *et al.* 2009): 1 – granica pola badawczego, 2 – granica obszaru doświadczalnego, 3 – stojąca plama olejowo – ropna, 4 – miejsce skażone, 5 – profil pomiarowy, 6 – istniejąca ścieżka, 7 – otwór wiertniczy

Fig. 2. Experimental area map (Żogała *et al.* 2009): 1 – border of studied area, 2 – border of experimental area, 3 – surface oil smudge, 4 – contaminated area, 5 – measuring profile, 6 – footpath, 7 – borehole

Profil doświadczalny MM' (Fig. 2) o długości 40 m, wytyczono bezpośrednio nad miejscem o udokumentowanym skażeniu produktami ropopochodnymi (Żogała 2009). Wzdłuż tego profilu, w odstępach 5 m, wywiercono 9 płytkich otworów badawczych, na podstawie których wykreślono szczegółowy przekrój litologiczny (Fig. 3).

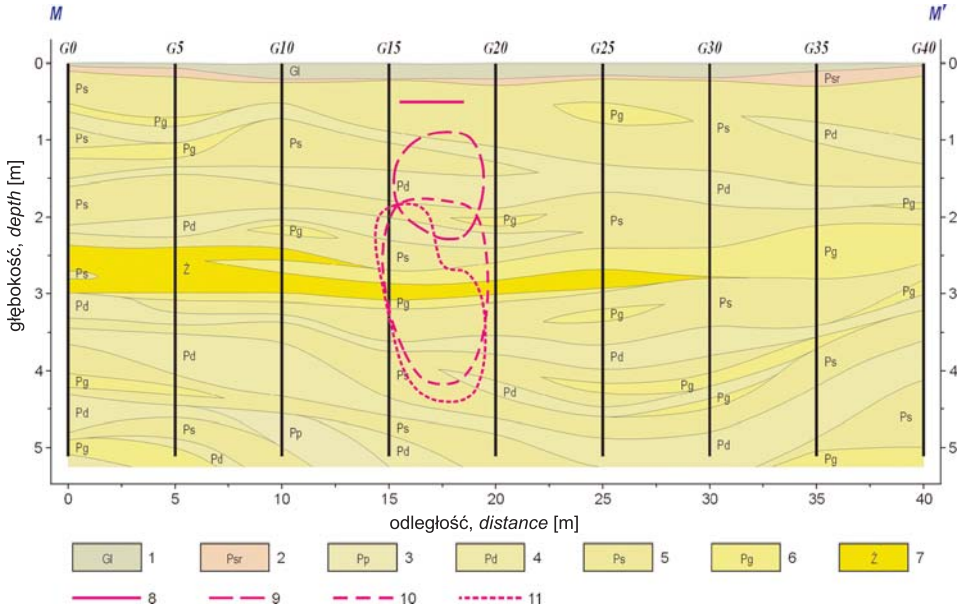


Fig. 3. Przekrój litologiczny wzdłuż profilu pomiarowego MM' (Żogała *et al.* 2009): 1 – gleba, 2 – piasek średnioziarnisty rdzawy, 3 – piasek pylasty, 4 – piasek drobnoziarnisty, 5 – piasek średnioziarnisty, 6 – piasek gruboziarnisty, 7 – żwir, 8 – miejsce skażenia, 9 – zasięg strefy skażenia po kilku dniach, 10 – zasięg strefy skażenia po pół roku, 11 – zasięg strefy skażenia po 1 roku. Zasięgi stref skażenia wyznaczone metodą obrazowania opornościowego

Fig. 3. Lithological cross – section MM' (Żogała *et al.* 2009): 1 – soil, 2 – medium grained sand red in colour, 3 – dusty sand, 4 – fine grained sand, 5 – medium grained sand, 6 – coarse grained sand, 7 – gravel, 8 – contaminated area, 9 – contaminated zone after several days, 10 – contaminated zone after half a year, 11 – contaminated zone after one year. The range of the contaminated area defined by ERT method

Pomiary oporności oraz polaryzacji indukowanej w domenie czasu zrealizowano aparaturą Lund Imaging firmy ABEM. Miernik SAS 4000, który wchodzi w skład systemu obrazowania, w trybie IP mierzy zanik napięcia po wyłączeniu przepływu prądu. Wynikiem pomiaru są wartości ładowności M wyrażone w milisekundach i liczone jako pole pod krzywą zaniku napięcia. Matematycznie ładowność można zdefiniować jako:

$$M = \frac{1}{V_0} \int_{t_i}^{t_{i+1}} V(t) dt \quad [\text{ms}] \quad (1)$$

gdzie t_i i t_{i+1} oznaczają początek i koniec okna pomiarowego, V_0 to wartość napięcia mierzona w momencie przepływu prądu, $V(t)$ jest napięciem odpowiedzi, zanikającym po wyłączeniu prądu.

Podczas pomiarów, które wykonane zostały we wrześniu 2008 roku, użyto wymiennie dwóch typów elektrod: stalowych – ze stali nierdzewnej i niepolaryzujących Cu/CuSO₄. Zastosowano układ dipolowy sugerowany do pomiarów IP (Loke 2004, Oldenburg & Li 1994, Vanhala 1997) z uwagi na niskie sprzężenia elektromagnetyczne. Elektrody rozmieszczone zostały wzdłuż profilu w odstępach 1 m. Parametry przyjęte do pomiaru zestawiono w tabeli 1.

Tabela (Table) 1

Parametry przyjęte w pomiarach IP
Selected parameters in IP measurements

Parametr, <i>parameter</i>	Wartość, <i>Value</i>
prąd maksymalny, <i>maximal current</i>	100 mA
prąd minimalny, <i>minimal current</i>	20 mA
czas pomiaru, <i>measurement time</i>	2 s
opóźnienie wstępne, <i>initial delay</i>	0.01 s
podstawowy interwał czasu pomiarowego, <i>base time interval</i>	0.1 s
liczba okien pomiarowych, <i>measurement windows number</i>	5
liczba składanych pomiarów, <i>stacks number</i>	4

WYNIKI POMIAROWE I DYSKUSJA

Pomiary ładowalności, zarówno dla elektrod stalowych jak i niepolaryzujących, dla wszystkich zaprogramowanych okien czasowych zestawiono w formie krzywych rozładowania dla wybranej głębokości 2 m (Fig. 5). Głębokości tej odpowiada układ o długości dipola $a=2$ m i odległości między dipolami $na=6$ m (Loke 2004). Spośród wszystkich danych pomiarowych wybrano linię na głębokości 2 m, ponieważ wcześniejsze badania z roku 2008 – laboratoryjne i geoelektryczne (Żogała *et al.* 2009) udokumentowały istnienie tu strefy zanieczyszczonej substancjami ropopochodnymi (Fig. 3, 4).

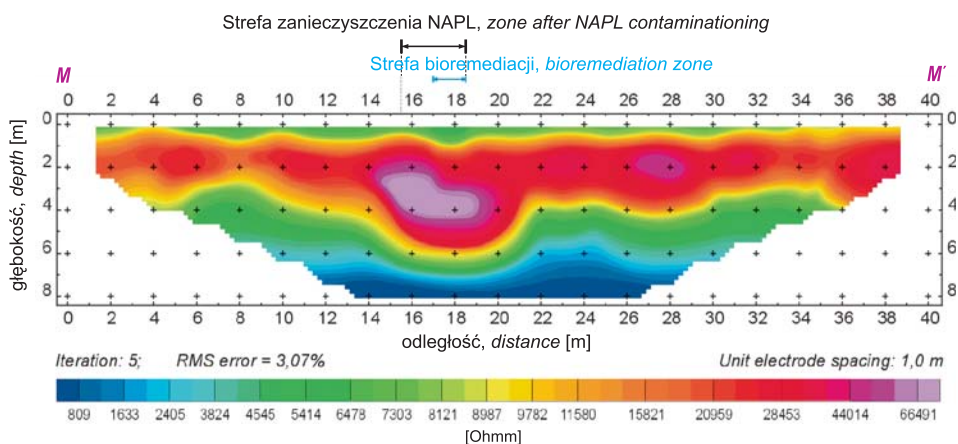


Fig. 4. Przekrój elektrooporowy MM' (Żogała *et al.* 2009)

Fig. 4. Resistivity cross – section MM' (Żogała *et al.* 2009)

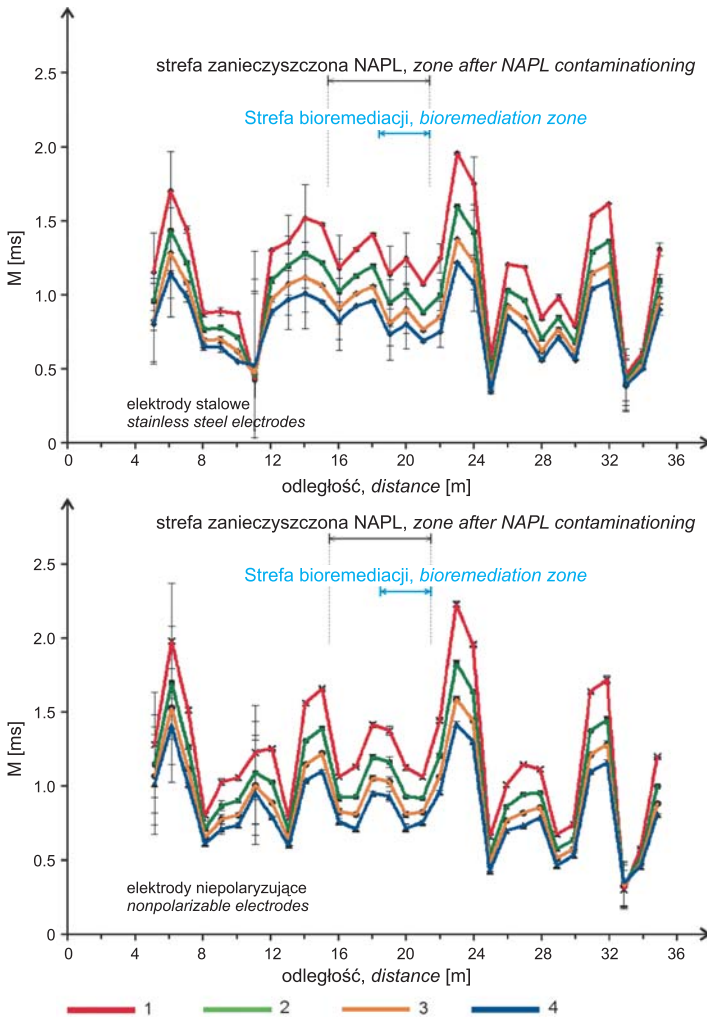


Fig. 5. Krzywe profilowań ładowności dla elektrod stalowych i niepolaryzujących wzdłuż profilu MM' dla różnych okien czasowych: 1–2. okno czasowe (110÷210 ms), 2–3. okno czasowe (210÷310 ms), 3–4. okno czasowe (310÷410 ms), 4–5. okno czasowe (410÷510 ms)

Fig. 5. Chargeability profile curves for stainless steel and nonpolarizable electrodes along MM' profile for different time windows: 1–2nd time window (110÷210 ms), 2–3rd time window (210÷310 ms), 3–4th time window (310÷410 ms), 4–5th time window (410÷510 ms)

Pierwsze okno czasowe zostało pominięte ze względu na jego zaburzony charakter, który prawdopodobnie wynika z procesów elektrochemicznych występujących bezpośrednio po odłączeniu prądu. Na interpretowanej głębokości zarejestrowano 31 punktów pomiarowych. W oparciu o krzywe profilowań IP z wszystkich zarejestrowanych punktów wybrano trzy reprezentatywne – dwa zlokalizowane na obszarze zanieczyszczonym (16 i 18 m profilu

MM') oraz punkt reprezentujący średnią ładowność dla obszaru nieskażonego (27 m profilu MM'). Porównanie wartości ładowności w tych punktach, wraz z odchyleniem standardowym, zarówno dla elektrod stalowych jak i niepolaryzujących dla wszystkich okien czasowych zamieszczono w tabeli 2, a odpowiadające im krzywe rozładowania przedstawiono na figurze 6.

Tabela (Table) 2

Zestawienie ładowności mierzonych elektrodami stalowymi i niepolaryzującymi dla 16, 18 i 27 metrażu (w nawiasach podano odchylenie standardowe)

Comparison of chargeability values measured by stainless steel and nonpolarizable electrodes for distances 16, 18 and 27 meters with their standard deviation

Odległość [m] Distance [m]	Typ elektrody Electrode type	Przedziały czasowe, Time intervals				
		10÷110 [ms]	110÷210 [ms]	210÷310 [ms]	310÷410 [ms]	410÷510 [ms]
16	Stal nierdzewna Stainless steel	1.411 (±0.197)	1.190 (±0.228)	1.033 (±0.225)	0.913 (±0.208)	0.830 (±0.201)
	Niepolaryzująca Non-polarizable	1.297 (±0.031)	1.067 (±0.0115)	0.925 (±0.024)	0.830 (±0.024)	0.761 (±0.023)
18	Stal nierdzewna Stainless steel	1.817 (±0.073)	1.421 (±0.012)	1.205 (±0.012)	1.066 (±0.012)	0.967 (±0.012)
	Niepolaryzująca Non-polarizable	1.397 (±0.012)	1.425 (±0.002)	1.203 (±0.018)	1.059 (±0.019)	0.955 (±0.018)
27	Stal nierdzewna Stainless steel	1.822 (±0.012)	1.198 (±0.008)	0.972 (±0.007)	0.846 (±0.006)	0.755 (±0.008)
	Niepolaryzująca Non-polarizable	1.913 (±0.003)	1.154 (±0.007)	0.949 (±0.007)	0.822 (±0.007)	0.734 (±0.007)

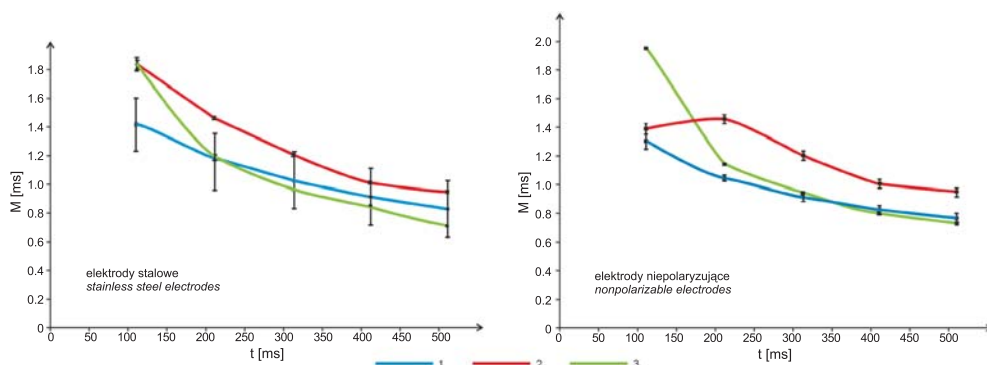


Fig. 6. Krzywe ładowności mierzone elektrodami stalowymi i niepolaryzującymi dla metrażu 16, 18 i 27 wraz z odchyleniami standardowymi: 1 – krzywa dla 16 m profilu MM' (obszar zanieczyszczony), 2 – krzywa dla 18 m profilu MM' (strefa bioremediacji), 3 – krzywa dla 27 m profilu MM'

Fig. 6. Chargeability decay curves measured by stainless steel and nonpolarizable electrodes for distances 16, 18 and 27 meters with their standard deviation: 1 – curve for 16 m profile MM' (contamination area), 2 – curve for 18 m profile MM' (bioremediation zone), 3 – curve for 27 m profile MM'

Analiza krzywych profilowania IP wzdłuż linii testowej MM' wykazała występowanie, zarówno dla elektrod stalowych jak i niepolaryzujących, efektu ładowania, pomimo że jest to ośrodek typowo piaszczysty, nie zawierający przewarstwień ilastych. Taki efekt potwierdzają wcześniejsze badania Vanhala *et al.* (1992), którzy podają, że osady polodowcowe Północnej i Środkowej Europy wywołują mierzałne odpowiedzi IP, chociaż często osady te nie mają w swoim składzie minerałów ilastych lub zawierają ich niewielkie ilości. W przypadku skażenia takiego ośrodka związkami organicznymi, w tym także węglowodorami, obserwuje się wysokie wartości oporności właściwej i obniżone wartości odpowiedzi IP (Olhoeft 1985, Martinho *et al.* 2006). Przy długotrwałym zanieczyszczeniu, ulegającym naturalnej bioremediacji, Vanhala (1997) wskazuje na występowanie spadku oporności i wzrostu efektu IP. Proces rozkładu węglowodorów prowadzi do zwiększenia mineralizacji, co tym samym zwiększa wartość ładowalności (Martinho *et al.* 2006). Zestawienie krzywych profilowania (Fig. 5) pokazuje przebieg zmian odpowiedzi IP wzdłuż profilu MM'. Podwyższone wartości ładowalności korelują z dodatnimi anomaliami oporności właściwej (Fig. 4). Sytuacja taka występuje na 7, 14, 15, 23 oraz 31 m profilu. Może to być związane z niewielką ilością niewidocznych makroskopowo minerałów ilastych. Z uwagi na dość skomplikowaną litologię postglacjalną trudno jest jednoznacznie wskazać przyczyny tych anomalii. Dokładna analiza składu mineralnego osadów prawdopodobnie pozwoliłaby znaleźć przyczynę wzrostu ładowalności ośrodka geologicznego.

W miejscu udokumentowanego skażenia węglowodorami zaobserwowano dla wszystkich okien czasowych lokalne obniżenie rejestrowanych wartości ładowalności. W centralnej jego części, tj. między 17 a 18 metrem występuje z kolei lokalny jej wzrost. Można to powiązać z zachodzącą w okresie 5 miesięcy (maj – wrzesień) bioremediacją, wywołaną przez wprowadzenie do gruntu drożdży *Yarrovia lipolytica* (Żogała *et al.* 2009). Porównanie krzywych profilowań IP dla głębokości około 0.6 m i 4 m wydaje się potwierdzać powyższy wniosek. Na głębokości 0.6 m, odpowiadającej strefie najdłuższej bioremediacji, także stwierdzono występowanie lokalnego podwyższenia ładowalności w interwale 16÷18 m. Na linii odpowiadającej głębokości 4 m wzrost ten nie jest obserwowany, co może wskazywać, że na tej głębokości proces bioremediacji już nie zachodzi.

Na krzywych rozładowania, zarówno dla elektrod stalowych jak i niepolaryzujących, można zaobserwować, że najwyższe wartości ładowalności rejestrowane są dla punktu zlokalizowanego w rejonie udokumentowanego zanieczyszczenia poddanego bioremediacji (Fig. 6). Zestawienie wykresów ładowalności wraz z jej odchyleniem standardowym dla obu typów elektrod wskazuje, że stosując elektrody niepolaryzujące uzyskuje się większą powtarzalność wyników w danym punkcie pomiarowym. Zaobserwowano, że krzywe rozładowania uzyskane dla obszaru czystego i poddanego bioremediacji mają podobny kształt, posiadają zbliżone wartości stałej czasowej. Natomiast krzywa uzyskana dla obszaru zanieczyszczonego węglowodorami charakteryzuje się niższą stałą czasową. Martinho *et al.* (2006) podają, że relatywnie wyższe wartości stałej czasowej korelują z obszarami czystymi lub o niskim stopniu skażenia, a zatem w naszym przypadku taki efekt może świadczyć o skuteczności procesu bioremediacji.

WNIOSKI

1. W metodzie potencjałów wzbudzonych obserwuje się zmiany wartości odpowiedzi IP w ośrodku gruntowo-wodnym czystym i skażonym. Obszar zanieczyszczony węglowodorami wykazuje obniżone wartości ładowalności, a czysty – wartości podwyższone.

2. Metoda pozwala kontrolować postępujący proces bioremediacji. Miejsce skażone poddane bioremediacji wykazuje wyższą ładowność niż obszar skażony, nie poddany procesowi oczyszczania.
3. Elektrody niepolaryzujące Cu/CuSO₄ na obszarach postglacjalnych zapewniają większą powtarzalność wyników w porównaniu z elektrodami stalowymi.

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego N525 013 32/1715.

Praca była prezentowana na VII Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Geofizyka w geologii, górnictwie i ochronie środowiska” organizowanej z okazji jubileuszu 90-lecia AGH na WGGiOŚ.

LITERATURA

- Dahlin T., Leroux V. & Nissen J., 2002. Measuring techniques in induced polarization imaging. *Journal of Applied Geophysics*, 50, 279–298.
- Loke M.H., 2004. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. www.geoelectrical.com
- Martinho E., Almeida F. & Senos Matias M.J., 2006. An experimental study of organic pollutant effects on time domain induced polarization measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 60, 27–40.
- Olhoeft G.R., 1985. Low-frequency electrical properties. *Geophysics*, 50, 12, 2492–2503.
- Oldenburg D.W. & Li Y., 1994. Inversion of induced polarization data. *Geophysics*, 59, 9, 1327–1341.
- Telford W.M., Geldart L.P. & Sheriff R.E., 1993. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 578–610.
- Schön J.H., 1996. *Physical Properties of Rocks: fundamentals and principles of petrophysics*. Pergamon Press, Oxford, 453–464.
- Sumner J.S., 1976. *Principles of induced polarization for geophysical exploration*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Vanhala H., Soininen H. & Kukkonen I., 1992. Detecting organic chemical contaminants by spectral-induced polarization method in glacial till environment. *Geophysics*, 57, 8, 1017–1017.
- Vanhala H., 1997. Mapping oil-contaminated sand and till with the spectral induced polarization (SIP) method. *Geophysical Prospecting*, 45, 303–326.
- Ward S.H., 1997. *Geotechnical and Environmental Geophysics*. Investigations in Geophysics, 5, Society of Exploration Geophysicists.
- Żogała B., Dubiel R., Lewandowski J., Zuberek W.M. & Gaska G., 2008. Application of resistivity imaging method for investigation of geologic structure of Pleistocene sediment. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 5, 2(150), 177–183.
- Żogała B., Robak M, Dubiel R., Zuberek W.M., Steininger M. & Wzientek K., 2009. Geoelectrical methods for detection of oil contaminations in soils and bioremediation process monitoring. SAGEEP 2009 (w druku).