WYNIKI BADAŃ GEOFIZYCZNYCH

Michał G. ROMAN

WYNIKI BADAŃ GEOFIZYKI WIERTNICZEJ W OTWORACH JEZIORO OKRĄGŁE IG 1 I JEZIORO OKRĄGŁE IG 2

Opracowanie danych geofizyki wiertniczej wykonano m.in. w programie Techlog, który został udostępniony Państwowemu Instytutowi Geologicznemu – Państwowemu Instytutowi Badawczemu (PIG-PIB) przez Schlumberger Information Solutions w celu prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Wszystkie głębokości mierzone są od poziomu powierzchni terenu wzdłuż osi otworu.

ZAKRES WYKONANYCH BADAŃ

Nie zachowała się dokumentacja wynikowa otworu wiertniczego Jezioro Okrągłe IG 1. Dostępne są scyfrowane w latach 90. XX w. wybrane pomiary geofizyki wiertniczej (nr identyfikacyjny CBDG otworu: 8198, nazwa: „Okrągłe IG-1"). Ponadto w opracowaniu Pokorskiego (1966) część profilowań geofizyki wiertniczej jest dostępna w postaci analogowej – zostały one scyfrowane w ramach niniejszego opracowania. Pomiary wykonywało Przedsiębiorstwo Poszukiwań Geofizycznych prawdopodobnie w trzech odcinkach pomiarowych do końca 1964 r. Dostępne obecnie profilowania geofizyki wiertniczej zestawiono w tabeli 25. Część profilowań zaznaczonych pogrubieniem została scyfrowana z krokiem próbkowania 0,25 m i jest dostępna w CBDG w postaci trzech plików formatu LAS (pliki tekstowe zawierające zestandaryzowany nagłówek z informacjami o otworze i odcinku grupujący część/całość krzywych z odcinka pomiarowego), zawierających odcinkowe, źródłowe pomiary oraz jeden plik LAS z pomiarami połączonymi. We wszystkich ww. plikach głębokości podano w metrach pod poziomem terenu wg miary geofizycznej, bez uwzględnienia poprawki na skrzywienie otworu.

W zasobach CBDG znajdują się również oznaczenia gęstości objętościowej oraz porowatości efektywnej wykonywanej na próbkach rdzenia (np. dla otworu Jezioro Okrągłe IG 1 dostępnych jest 1856 oznaczeń gęstości i 170 porowatości) (Blus, 1968). Obliczono również średnie gęstości przewierconych warstw skalnych z poszczególnych warstw litologicznych na podstawie ww. oznaczeń gęstości (Rosowiecka, 2011). Nieznane są niestety dokładne głębokości poboru takich próbek (dostępne są jedynie przedziały zakresu rdzeniowania, niekiedy znacznego) i dlatego zrezygnowano z ich graficznej prezentacji.

W otworze Jezioro Okrągłe IG 2 pomiary geofizyki wiertniczej wykonano w dwóch odcinkach pomiarowych (pokrywa osadowa i skały podłoża prekambryjskiego). Badania były wykonywane przez Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych w okresie od 12.07.1985 r. do 12.01.1986 r. Pomiar wykonano analogowymi aparaturami AKS/Ł-7, następnie w latach 90. część profilowań scyfrowano. Scyfrowane dane pomiarowe znajdują się w formacie plików LAS w CBDG (nr identyfikacyjny CBDG otworu: 119881, nazwa: „Jezioro Okrągłe IG-2"). Oryginalne analogowe materiały znajdują się w Narodowym Archiwum Geologicznym PIG-PIB pod nr 134148. Pomiary geofizyki wiertniczej wykonane w otworze zestawiono w tabeli 26. Część profilowań zaznaczonych pogrubieniem została scyfrowana z krokiem próbkowania 0,25 m i jest dostępna w CBDG w postaci: 19 plików o rozszerzeniu .BKR (pliki tekstowe zawierające pojedyncze profilowania kompatybilne z systemem GEOFLOG – Szewczyk, 1996), dwóch plików formatu LAS zawierających odcinkowe, źródłowe pomiary oraz jednego plik LAS z pomiarami połączonymi. We wszystkich wymienionych wyżej plikach głębokości podano w metrach pod poziomem terenu wg miary geofizycznej, bez uwzględnienia poprawki na skrzywienie otworu.

Tabela 25

Wykaz badań geofizyki otworowej wykonanych w otworze Jezioro Okrągłe IG 1

List of well logs performed in the Jezioro Okrągłe IG 1 borehole

Data wykonania badań Date of measurement	Rodzaj wykonanych badań (skrót) Type of measurement (abbreviated)	Interwał głęb. badań [m] Depth interval	Głęb. otworu podczas wykonywania badań [m] Borehole depth during measurement	Średnica nominalna otworu [mm] Caliper
Brak danych	**PO: M0.5A0.1B (EL02)**	50–350	brak danych	brak danych
	PO: B4.0A0.5M (EN20)	50–350		
	PG	2–350		
	PS	50–345		
	PŚr	50–350		
	PG	350–1100		
	PŚr	350–1100		
	PS	350–1100		
	PO: M0.5A0.1B	350–1100		
	PO: B4.0A0.5M (EN20)	350–1025		
30–31 XII 1964	**PG**	350–1245	1245,9	180
	PS	350–1245		
	PŚr	350–1245		
	POP	350–1245		
	PNG	350–1245		
	PGG	350–1245		
31 XII 1964	**PO: M0.5A0.1B (EL02)**	350–1245	1245,9	180
	PO: M1.0A0.1B (EL03)	350–1245		
	PO: M2.5A0.25B (EL 07)	350–1245		
	PO: M4.0A0.5B (EL14)	350–1245		
	PO: M8.0A0.5B (EL26)	350–1245		
	PO: B4.0A0.5M (EN20)	350–1245		
22 III 1965	**PO: M0.5A0.1B (EL02)**	1245–1400	1400,2	prawdopodobnie 143
	PO: M1.0A0.1B (EL03)	1245–1400		
	PO: M2.5A0.25B (EL 07)	1245–1400		
	PO: M4.0A0.5B (EL14)	1245–1400		
	PO: M8.0A0.5B (EL26)	1245–1400		
	PO: B4.0A0.5M (EN20)	1245–1400		
	PS	1245–1400		
	PŚr	1245–1400		
	PGG	1245–1400		
	PG	1245–1400		

PO – klasyczne profilowanie oporności (A, B – elektrody prądowe, M – elektroda pomiarowa, odległości między elektrodami w metrach); **PG** – profilowanie naturalnej promieniotwórczości gamma; **PS** – profilowanie naturalnych potencjałów; **PŚr** – profilowanie średnicy; **POP** – profilowanie oporności płuczki; **PNG** – profilowanie neutron gamma; **PGG** – profilowanie gamma-gamma. W tabeli pogrubioną czcionką zaznaczono profilowania dostępne w formie cyfrowej, a podkreślaniem – pomiary niedostępne w formie analogowej

PO – conventional electrical log (A, B – current electrodes, M – measurement electrode, distances between electrodes are expressed in meters); **PG** – gamma ray log; **PS** – spontaneous potential log; **PŚr** – caliper; **POP** – mud resistivity log; **PNG** – neutron-gamma ray log; **PGG** – gamma-gamma ray log. The font has been bolded in the case of digitalized curves, logs that are unavailable in analogous form has been underlined

Tabela 26

Wykaz badań geofizyki otworowej wykonanych w otworze Jezioro Okrągłe IG 2

List of well logs performed in the Jezioro Okrągłe IG 2 borehole

Data wykonania badań Date of measurement	Rodzaj wykonanych badań (skrót) Type of measurement (abbreviated)	Interwał głęb. badań [m] Depth interval	Głęb. otworu podczas wykonywania badań [m] Borehole depth during measurement	Średnica nominalna otworu [mm] Caliper
12–13 VII 1985	**PG**	0–1094	1098	rury 13 ⅜" do głęb. 296,6 m; do głęb. 308,8 m średnica 308 mm, poniżej średnica 216 mm
	PNG	10–1096		
	PGG	293–1096		
	PO: A2.5M0.25N (EN09)	293–1096		
	PO: N2.5M0.25A (EN10)	293–1096		
	PS x 2	293–1094		
	PŚr	293–1095		
	PK	0–1090		
7–12 I 1986	**PG**	1050–2300	2300	rury 6 ⅝" do głęb. 1098,4 m; poniżej średnica 112 mm
	PGG	1098–2300		
	POp: B2,5A0,25M	1098–2300		
	PPE	1098–2300		
	PŚr	1098–2999		
	PK	1025–2300		
	PKżyr	1025–2300		
	PM	1100–2300		

PPE – profilowanie potencjałów elektrodowych; **PK** – profilowanie krzywizny (przyrząd magnetyczny); **PKżyr** – profilowanie krzywizny (przyrząd żyroskopowy); **PM** – profilowanie magnetyczne; pozostałe objaśnienia jak w tabeli 25

PPE – electrode potential log; **PK** – deviation log (magnetic tool); **PKżyr** – inclinometry (gyroscopic tool); **PM** – magnetic log; other explanations in Table 25

OCENA JAKOŚCI DANYCH

Na jakość rejestracji profilowań miały wpływ następujące czynniki związane ze środowiskiem pomiaru:

1. Średnica otworu – rozmycie ścian otworu wpływa na jakość wykonanych pomiarów i ich interpretację. W otworze Jezioro Okrągłe IG 1 niestety brak jest pełnej i pewnej informacji o średnicy nominalnej wiercenia, w związku z czym trudno ocenić wielkość rozmyć powyżej głęb. 350 m. W interwałach głęb. 350–1180 i 1268–1364 m otwór jest powiększony w stosunku do średnicy nominalnej, a większe rozmycia można zaobserwować na głęb. 537–541 i 775–847 m. W otworze Jezioro Okrągłe IG 2 brak jest profilowania średnicy powyżej głęb. 270 m, nominalna średnica wiercenia jest zwykle utrzymana w skałach osadowych (do głęb. 1085 m), większe serie rozmyć występują w głęb. 615–627 i 653–714 m, ponadto mniejsze rozmycia można zaobserwować na głęb. 777–860 m. Po nawierceniu skał krystalicznych otwór został zarurowany i aż do dna wiercony jednym odcinkiem. Na profilowaniu średnicy widać wyraźnie wyrobienie otworu od buta rur okładzinowych, zmniejszające się stopniowo w stronę dna otworu, powstałe najprawdopodobniej przez obracający się, wyboczony przewód wiertniczy. Powiększenia średnicy otworu ponad zauważalną tendencję występują w pobliżu głęb. 1136, 1239, 1325, 1405, 1482, 1524, 1588, 1722, 1749 m i mają niewielką miąższość. Występują zwykle wraz z obniżeniem oporności i podwyższeniem promieniotwórczości gamma, w związku z czym są prawdopodobnie powiązane ze strefami spękań.
2. Rodzaj i właściwości płuczki wiertniczej – poza odcinkiem 350–1245 m w otworze Jezioro Okrągłe IG 1, w którym użyto płuczki iłowej o gęstości 1,28 g/cm^3, brak jest informacji na ten temat.
3. Ciśnienie i temperatura panujące w otworze – na dnie otworu Jezioro Okrągłe IG 2 (2300 m) temperatura wynosiła 39,5°C, brak innych informacji tego rodzaju. Można przypuszczać, że w obydwu otworach temperatura nie wpływała na stabilność pracy użytych sond jądrowych.

Na jakość i użyteczność obecnie dostępnych profilowań, oprócz wymienionych warunków panujących w otworze, wpływ ma także to, że:

1. Wyniki badań radiometrycznych nie były kalibrowane, jednostki, w których rejestrowano te profilowania to impulsy na minutę.

2. Wykonane w otworze klasyczne pomiary oporności w wariantach potencjałowym i gradientowym mierzą pozorne oporności skał.
3. Otwory wykonano w odstępie ponad 20 lat, co sprawia, że użyty sprzęt różnił się dokładnością i możliwościami pomiarów (np. wytypowanie stref okruszcowanych na podstawie pomiaru gamma-gamma w Jeziorze Okrągłym IG 1 jest trudniejsze i obciążone większą niepewnością niż w Jeziorze Okrągłym IG 2, w którym są one wyraźne).
4. Proces cyfrowania analogowo zarejestrowanych krzywych powoduje zwiększenie niepewności pomiaru. Możliwe są również inne błędy – w Jeziorze Okrągłym IG 2 zauważono np. podpisanie cyfrowej wersji kompozytowych krzywych potencjałowego profilowania oporności (*normal* – w zasobach CBDG oznaczane jako EN) jako profilowanie gradientowe (*lateral* – EL) i na odwrót lub użycie sondy o innym rozstawie do tworzenia krzywej kompozytowej (w Jeziorze Okrągłym IG 1 EL07 połączono i opisano jako EL09).

Profilowanie krzywizny otworu jest obecnie dostępne jedynie dla części otworu Jezioro Okrągłe IG 2. Zostało pomierzone z krokiem 25 m poniżej głęb. 1025 m dwoma metodami – magnetyczną i żyroskopową. Ustalone metodą graficzną, na podstawie żyroskopowego profilowania krzywizny, odejście dolnej części otworu od pionowego rzutu punktu początkowego wynosi 12,4 m i ma azymut 72°30' (Wojtowicz, Sobolewski, 1986 *w*: Wiszniewska i in., 1989). Porównanie pomiarów upadomierzem magnetycznym i żyroskopowym ujawnia duże (przekraczające nawet 100°) rozbieżności pomiędzy nimi w określeniu azymutu skrzywienia otworu, spowodowane lokalną anomalią magnetyczną, powiązaną z występowaniem tytanomagnetytu. Pomiary kontrolne upadomierza żyroskopowego (powtórne pomiary dla sześciu głębokości) wykazują zauważalne rozbieżności pomiaru azymutu wychylenia otworu sięgające 40°. Kąt skrzywienia otworu zwykle nie przekraczał 1°.

W otworze Jezioro Okrągłe IG 1 łączenie scyfrowanych obecnie profilowań z zachowanymi w postaci cyfrowej pomiarami w podłożu krystalicznym nie było możliwe z powodu braku niewielkiego wspólnego odcinka wyżej wymienionych profilowań. Uniemożliwiło to ich głębokościowe dopasowanie oraz skompensowanie różnicy amplitud, wynikłej z różnego rodzaju wykorzystanych sond i odmienności warunków otworowych pomiędzy tymi odcinkami (por. wkładka, głęb. ok. 1243 m). Analogiczna sytuacja ma miejsce na głęb. 350 m.

INTERPRETACJA PROFILOWAŃ GEOFIZYKI WIERTNICZEJ

W otworze Jezioro Okrągłe IG 2 celem badań geofizyki wiertniczej w przypadku pokrywy skał osadowych było wyznaczenie litologii i stratygrafii, a w skałach krystalicznych – wydzielenie stref rudnych i okruszcowanych oraz określenie wektora pola magnetycznego. W obu przypadkach oceniano również stan techniczny otworu (Wojtowicz, Sobolewski, 1985, 1986 *w*: Wiszniewska i in., 1989). Można przypuszczać, że w otworze Jezioro Okrągłe IG 1 interpretacja pomiarów geofizyki wiertniczej miała spełnić podobne zadania, poza określeniem wektora pola magnetycznego – w otworze tym nie wykonano pomiarów magnetycznych.

W obu otworach, z uwagi na brak rdzenia dla przeważającej części profilu pokrywy osadowej, główne źródło informacji na temat litologii pochodzi z interpretacji pomiarów geofizyki wiertniczej, skorelowanej z informacjami uzyskanymi z sąsiednich otworów (Pokorski, 1966; Wojtowicz, 1985 *w*: Wiszniewska i in., 1989). Litologię pokrywy osadowej, opisaną na podstawie geofizyki otworowej, przedstawiono w rozdziałach dotyczących litostratygrafii obydwu omawianych otworów.

W otworze Jezioro Okrągłe IG 2 wyznaczono cztery większe zgrupowania stref okruszcowanych na głęb.: 1233,6–1254,0; 1397,0–1419,6; 1566,5–1583,0 i 1748,0–1753,8 m (Wojtowicz, Sobolewski, 1986 *w*: Wiszniewska i in., 1989). Ponadto można również wyróżnić mniejsze strefy o podobnym charakterze na głęb.: 1263,5–1266,5; 1346,0–1352,5; 1358,5–1361,0; 1469,5–1471,5; 1540,5–1542,5 m. Strefy te charakteryzują się dużymi anomaliami magnetycznymi oraz krzywej profilowania potencjału elektrodowego, a także obniżeniem oporności i zwiększeniem gęstości objętościowej, obserwowanym jako minima na krzywej profilowania gamma-gamma (por. wkładka). Profilowanie naturalnej promieniotwórczości gamma w strefach okruszcowanych osiągało niskie wartości. Z analizy profilowania magnetycznego wynika, że najbardziej interesujący interwał znajduje się do głęb. 1830 m (Wojtowicz, Sobolewski, 1986 *w*: Wiszniewska i in., 1989).

W otworze Jezioro Okrągłe IG 1, na podstawie profilowań geofizyki wiertniczej, warstwy okruszcowane można wyróżnić na głęb. ok.: 1184,0–1187,0; 1192,0–1193,5; 1210,0–1212,0 m oraz strefy złożonej z 4–5 okruszcowanych warstw na głęb. 1295,0–1325,0 m.

Wyraźne dodatnie anomalie na krzywej profilowania gamma są spowodowane występowaniem granitu (często silnie spękanego). Na podstawie tej obserwacji oraz profilu litologicznego (Wiszniewska, 1989) zestawiono tabelę przesunięć głębokościowych pomiędzy rdzeniem a pomiarami geofizyki wiertniczej dla otworu Jezioro Okrągłe IG 2 (tab. 27). Przesunięcie geofizyki wiertniczej względem rdzenia w otworze Jezioro Okrągłe IG 1 wynosi ok. 5–6 m w dół i wydaje się stałe dla całego rdzeniowanego odcinka skał prekambryjskich.

Omawiane otwory wiertnicze znajdują się w strefie o najniższej w Polsce gęstości strumienia cieplnego (<50 mW/m^2 – Szewczyk, Gientka, 2009) oraz ustabilizowanej temperaturze na głęb. 2000 m p.p.t. wynoszącej ok. 40°C (Szewczyk, 2010).

Tabela 27

Tabela przesunięć głębokościowych pomiędzy głębokością geofizyczną a wiertniczą dla dolnego odcinka otworu Jezioro Okrągłe IG 2

Depth shifts between the logging depth and drillers depth in the lower section of the Jezioro Okrągłe IG 2 borehole

Głęb. geofizyczna Logging depth [m]	Głęb. wiertnicza Drillers depth [m]	Różnica Difference
1140,0	1139,3	0,7
1163,2	1161,8	1,4
1163,3	1161,8	1,5
1176,3	1175,6	0,7
1218,0	1218,0	0,0
1256,8	1255,9	0,9
1420,0	1419,6	0,4
1479,0	1479,7	–0,7
1481,7	1482,6	–0,9
1548,6	1548,6	0,0
1585,9	1585,1	0,8
1601,8	1600,9	0,9
1716,4	1715,9	0,5
1728,8	1727,8	1,0
1762,5	1760,3	2,2

Głęb. geofizyczna Logging depth [m]	Głęb. wiertnicza Drillers depth [m]	Różnica Difference
1797,2	1795,9	1,3
1893,9	1891,9	2,0
1966,2	1964,2	2,0
1996,2	1994,3	1,9
2079,0	2077,8	1,2
2082,9	2081,2	1,7
2125,1	2123,6	1,5
2126,2	2124,5	1,7
2157,7	2154,0	3,7
2171,0	2169,3	1,7
2172,0	2170,0	2,0
2207,9	2206,7	1,2
2208,0	2206,6	1,4
2291,4	2290,8	0,6

Olga ROSOWIECKA, Jerzy NAWROCKI

WYNIKI BADAŃ PETROMAGNETYCZNYCH I PALEOMAGNETYCZNYCH W UTWORACH ORDOWIKU I DOLNEGO SYLURU W OTWORZE WIERTNICZYM JEZIORO OKRĄGŁE IG 1

Parametry magnetyczne opisują zmiany w koncentracji tlenków żelaza, które bardzo często są uwarunkowane zmianami środowiska, w tym głównie klimatu. Podstawowym parametrem petromagnetycznym wykorzystywanym w badaniach klimatu jest podatność magnetyczna (MS – *magnetic susceptibility*). W morskich węglanach nośnikami MS są paramagnetyczne minerały ilaste oraz ferromagnetyczny magnetyt pochodzenia detrytycznego i biogenicznego (Ellwood i in., 2000). Dostawa do zbiornika morskiego ziaren detrytycznych może być wynikiem: (1) globalnych wahań poziomu morza rzutujących na zmiany bazy erozyjnej, (2) zmian klimatu rzutujących na poziom erozji, (3) lokalnych ruchów tektonicznych, (4) efektów związanych ze zdarzeniami impaktowymi (por. Crick i in., 2002).

Zmiany MS o krótkim okresie i małej amplitudzie są przeważnie odzwierciedleniem oscylacji klimatycznych, natomiast zmiany o dużej amplitudzie i długim okresie zwykle wiążą się z pierwszą z wymienionych przyczyn, czyli globalnymi wahaniami poziomu morza. Regresja morza prowadzi do obniżenia bazy erozyjnej i wzmożonej erozji, której wynikiem jest zwiększona dostawa materiału detrytycznego do basenów morskich. Stąd regresja morza może prowadzić do wzrostu MS, notowanego w osadach morskich. Transgresja to podwyższenie bazy erozyjnej i zmniejszenie dostawy detrytycznego magnetytu do basenów morskich. Podwyższenie bazy erozyjnej, wpływającej na kształt krzywych MS, może być również wynikiem intensywnych ruchów górotwórczych, co zauważyli Averbuch i in. (2005), badając profile węglanowe dewonu górnego z wielu miejsc Europy i Afryki. Powyższa teoria nie uwzględnia wtórnych procesów diagenetycznych (np. dolomityzacji, utlenienia siarczków w osadach pelagicznych), które bardzo często obejmują morskie skały węglanowe, a które mogą zasadniczo modyfikować kształt krzywych MS. Stąd podczas interpretacji pod uwagę powinno się brać wszelkiego rodzaju analizy minerałów odpowiedzialnych za właściwości magnetyczne badanych skał.

Miąższe i ciągłe profile skał węglanowych ordowiku i dolnego syluru z otworów zlokalizowanych w północno-wschodniej Polsce są dobrym materiałem do badań paleośrodowiskowych. Nie noszą one śladów późnych przemian diagenetycznych. Nigdy nie były na głębokościach implikujących podwyższone temperatury. Reprezentują interwał czasu, w którym zachodziły częste zmiany klimatu i znaczące fluktuacje poziomu morza (np. Ross, Ross, 1995; Nielsen, 2003a, b). Od wielu lat przedmiotem badań są zwłaszcza późnoordowickie zlodowacenia i towarzyszący im epizod masowego wymierania (Brenchley i in., 1994; Sepkowski, 1995).

METODY I ZAKRES BADAŃ

Badania petromagnetyczne w otworze wiertniczym Jezioro Okrągłe IG 1 wykonano dla odcinka 840–945 m, tj. dla węglanowych utworów dolnosylurskich i ordowickich (Modliński, Szymański, 2001). Pobrano 106 próbek w ok. 1-metrowych odstępach. Każdą próbkę zorientowano w kierunku góra–dół, a następnie wycięto z niej kilka próbek sześciennych o objętości 8 cm^3 (w sumie ok. 300 sztuk). Na tak przygotowanych próbkach wykonano zestaw badań petromagnetycznych, obejmujący pomiary: MS, natężenia naturalnej pozostałości magnetycznej (INRM), natężenia izotermalnej pozostałości magnetycznej (IRM) oraz natężenia bezhisterezowej pozostałości magnetycznej (ARM). Na 19 próbkach wykonano test Lowriego (Lowrie, 1990). Wyniki pomiarów IRM opisano przy pomocy parametru S, definiowanego jako stosunek bezwzględnej wartości IRM nałożonego polem 0,3 T o zwrocie przeciwnym do wartości IRM wcześniej nałożonego polem 1,5 T (King, Channel, 1991). Dla ferrimagnetyków (magnetyt, maghemit) S jest bliskie 1 i maleje wraz ze wzrostem zawartości minerałów o wysokiej koercji (hematyt, getyt).

Badaniom petromagnetycznym towarzyszyły standardowe analizy paleomagnetyczne, przeprowadzone w celu określenia reperów chronostratygraficznych, uzupełniających horyzonty biostratygraficzne. Próbki były rozmagnesowywane metodą termiczną, a pomiary kierunków namagnesowania wykonano z zastosowaniem magnetometru rotacyjnego JR6 firmy AGICO. Pomiary te kontrolowano prowadzonymi równolegle pomiarami MS. Kierunki paleoinklinacji wyznaczono przy użyciu oprogramowania RemaSoft (Chadima, Hrouda, 2006). Ściśle ograniczona liczba wyników dla poszczególnych poziomów opróbowania uniemożliwiła wykonanie standardowych statystyk. W tej sytuacji przyjęto następujący klucz wyznaczania końcowego wyniku: a) w przypadku uzyskania dwóch kierunków o tej samej polarności różniących się od siebie nie więcej niż 30° obliczano średnią arytmetyczną; b) w sytuacji uzyskania dwóch kierunków o niskiej zgodności (różnica przekracza 30º przy tej samej polarności) wybierano kierunek określony z większą precyzją; c) w przypadku uzyskania dwóch wyników o przeciwnej polarności wybierano kierunek oznaczony z większą precyzją, dla większego przedziału temperatury.

WYNIKI

Petromagnetyzm

Zestawienie wszystkich wykonanych analiz petromagnetycznych przedstawiono na figurze 42. Krzywa MS (fig. 42B) wykazuje stosunkowo niewielkie zróżnicowanie wartości. Próbki pobrano z wapieni i margli, które z reguły charakteryzują się dość niskimi wartościami MS. Krzywą MS uśredniono w oknie 5 prób, uzyskując krzywą $MS_{śr}$ (czarna krzywa na figurze 42B). Na tej krzywej można wyodrębnić kilka oscylacji, które, co istotne, nie wykazują wyraźnego związku ze zmianami w litologii. Widoczny jest także delikatny trend wzrostowy $MS_{śr}$ wraz z głębokością w obrębie odcinka ordowickiego. Na odcinku sylurskim (landowerskim) jest natomiast widoczny wyraźny podział na dwa odcinki o skrajnych wartościach.

Większe zróżnicowanie można zaobserwować na krzywej parametru S (fig. 42C). Bazując na przebiegu tej krzywej, badany profil ordowiku podzielono na trzy charakterystyczne odcinki. Dolny odcinek profilu (głęb. 926,5–941,7 m) zawiera nośniki magnetyczne charakteryzujące się $S \approx 0{,}75$, co wskazuje na obecność minerałów o wysokiej koercji, a więc np. hematytu. Towarzyszy temu duże zróżnicowanie ogólnie wysokich wartości INRM, a to znajduje odzwierciedlenie w litologii – występują tu czerwonawe wapienie margliste, zawierające żelaziste ooidy (Modliński, Szymański, 2001). Charakterystyczne dla tego odcinka są stosunkowo niskie wartości ARM/SIRM. Teoretycznie współczynnik ten maleje ze wzrostem koncentracji magnetytu.

Mniej więcej na poziomie 926,5 m, czyli na przyjętej przez autorów granicy pomiędzy odcinkiem dolnym a środkowym znajduje się lokalne minimum na krzywej poziomu morza (fig. 42F). Odcinek środkowy (912,5–926,5 m) przejawia najniższe wartości S, a zatem zdominowany jest przez minerały o najwyższej koercji. Przejście z odcinka środkowego do górnego (912,5 m) występuje na granicy uhaku i kukruse (Modliński, Szymański, 2001). Górny odcinek rdzenia (głęb. 836–912 m) tworzy grupę próbek o niskiej koercji.

Biorąc pod uwagę kolejne z pomierzonych parametrów, w skałach ordowiku górnego znacznej zmianie ulega skład mineralny wapieni, nie tylko w zakresie rodzaju nośników magnetycznych, ale także ich ilości (koncentracji) w skale. Niskim wartościom INRM (fig. 42D) towarzyszą wysokie wartości ARM/SIRM (za SIRM przyjęto IRM nałożony polem 1,5 T) (fig. 42E). Należy wnioskować, że koncentracja minerałów ferromagnetycznych w tych utworach jest bardzo niska i ewentualna interpretacja ich zmienności wzdłuż profilu powinna być przeprowadzana dla górnej części, niezależnie od części dolnej. Delikatny wzrost ARM/SIRM występuje na odcinku ok. 891–911 m. Głębokość 891 m jest granicą pomiędzy piętrami oandu a rakvere.

Testy Lowriego (próbki poddane testowi zaznaczono na fig. 42C) potwierdzają opisane wcześniej rezultaty i jednocześnie pomagają w precyzyjniejszym określeniu nośników magnetycznych. W próbach JO1 (fig. 43A), JO8 i JO10 (dolny odcinek profilu) najsilniejszą jest krzywa minerałów o najwyższej koercji. Na obecność np. hematytu wskazuje

także temperatura pełnego rozmagnesowania 620°C (maksymalna temperatura jaką zastosowano).

Podobny charakter mają diagramy próbek JO29, JO34 i JO37 (odcinek środkowy), gdzie nadal dominującą jest składowa twarda – czyli wysokiej koercji. Różnica polega na obecności niemal równie silnej krzywej pośredniej, a więc wskazującej na minerały o średniej koercji, takie jak np. pirotyn, maghemit, tytanomagnetyt. Ostatni minerał należy raczej odrzucić. Jego temperatura Curie (T_C) jest niższa od T_C magnetytu i zależy od udziału tytanu w minerale. T_C pirotynu to 320°C, a więc biorąc pod uwagę fakt, że składowa pośrednia ulega rozmagnesowaniu w temperaturze 620°C, także należy go wykluczyć. W pozostałych próbach (górny odcinek profilu) składowe miękka i twarda są bardzo słabe, dominuje natomiast składowa pośrednia. T_C jest rzędu 550°C – nie jest to jednak wskazaniem obecności tytanomagnetytu, ze względu na jego niższą koercję.

W kilku przypadkach (np. JO39 – fig. 44C) zaobserwowano wygięcie krzywej w przedziale temperatur 300–350°C, w którym mieści się T_C pirotynu. Niestety wszystkie próbki, w których dominuje składowa średniej koercji, wykazują się ogólnie bardzo niskimi wartościami natężenia IRM, co może utrudniać prawidłową interpretację wy-

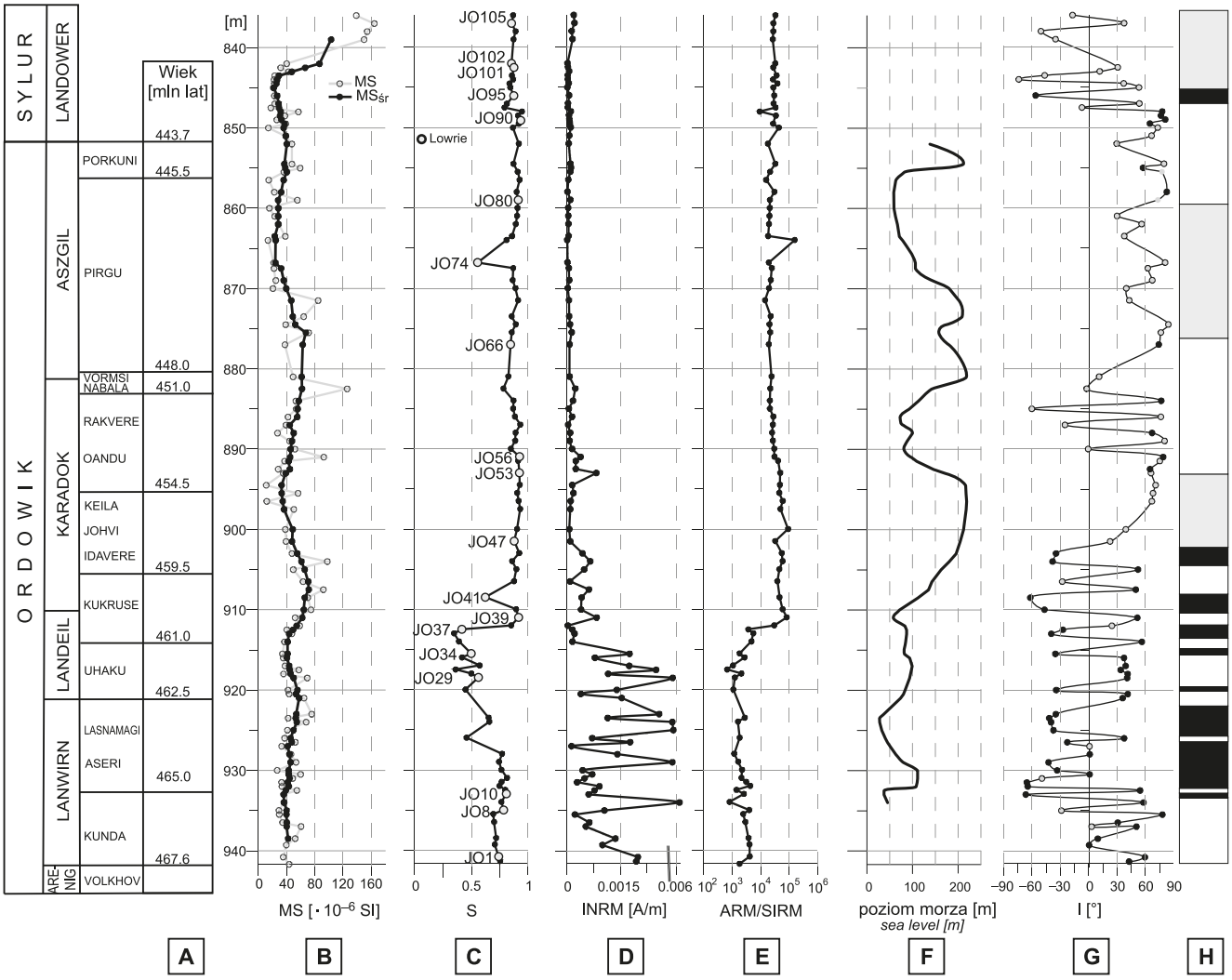

Fig. 42. Wyniki badań petromagnetycznych i paleomagnetycznych przeprowadzonych na próbkach pobranych z utworów ordowiku i dolnego syluru z otworu Jezioro Okrągłe IG 1

A – profil stratygraficzny (Modliński, Szymański, 2001); **B** – podatność magnetycznej MS i $MS_{śr}$; **C** – parametr S z zaznaczeniem próbek, dla których wykonano test Lowriego; **D** – INRM; **E** – ARM/SIRM; **F** – zmiany poziomu morza względem poziomu współczesnego (wg Thorshøj Nielson, 2004); **G** – inklinacja I; **H** – diagram magnetostratygraficzny: bloki czarne – polarność normalna, bloki białe – polarność odwrotna, bloki szare – kierunki niepewne

Results of petromagnetic and palaeomagnetic analysis of Ordovician and Lower Silurian sediments in Jezioro Okrągłe IG 1 borehole

A – stratigraphy (Modliński, Szymański, 2001); **B** – magnetic susceptibility MS and MS_{AVG}; **C** – S-parameter, Lowrie test samples are marked; **D** – INRM; **E** – ARM/SIRM; **F** – eustatic sea-level curve from Thorshøj Nielson, 2004; **G** – inclination I; **H** – magnetic polarity scale: clack blocks – normal polarity, white blocks – reversed polarity, grey blocks – uncertain directions

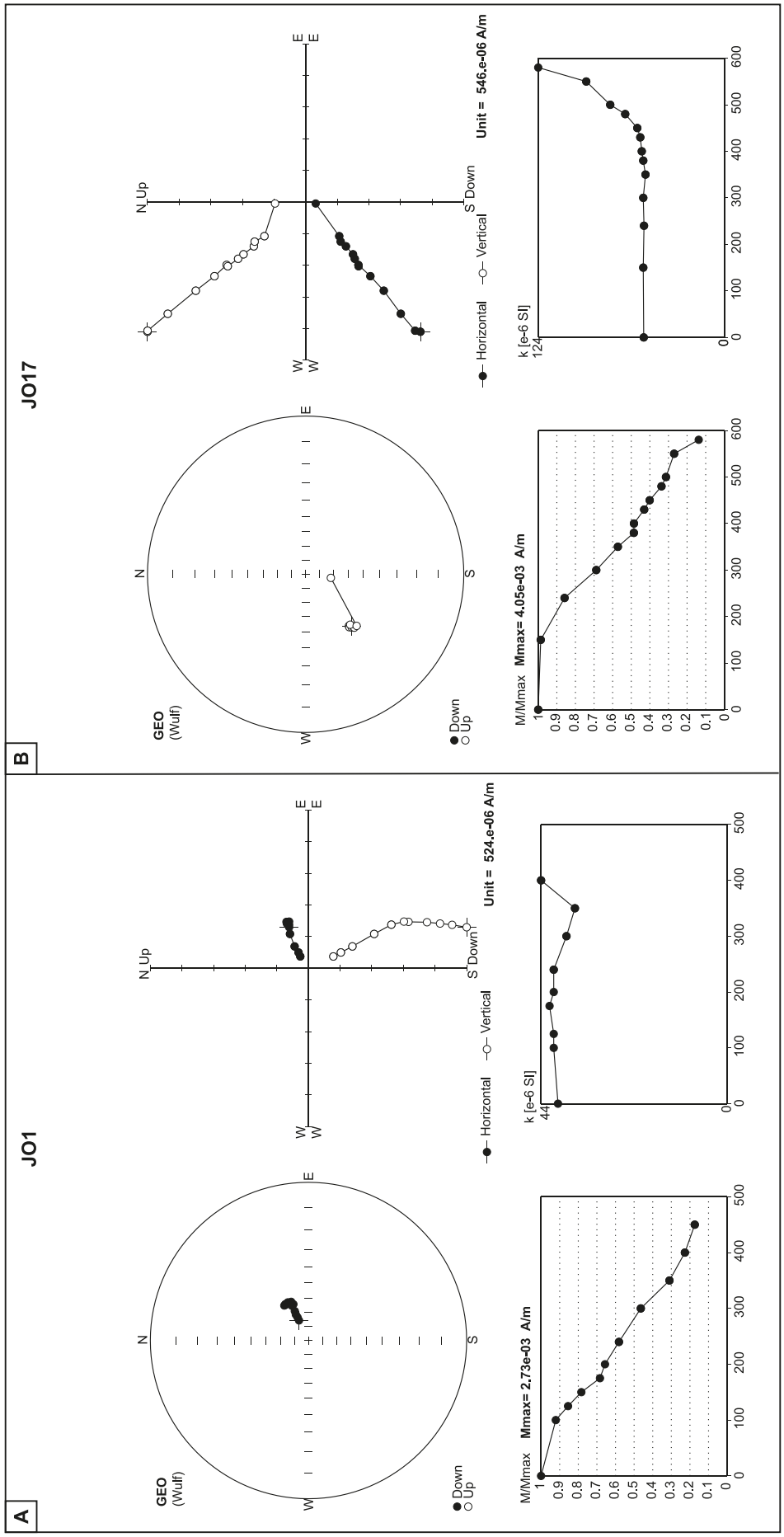

Fig. 43. Przykładowe diagramy Zijderfelda

Examples od Zijderfeld's diagrams

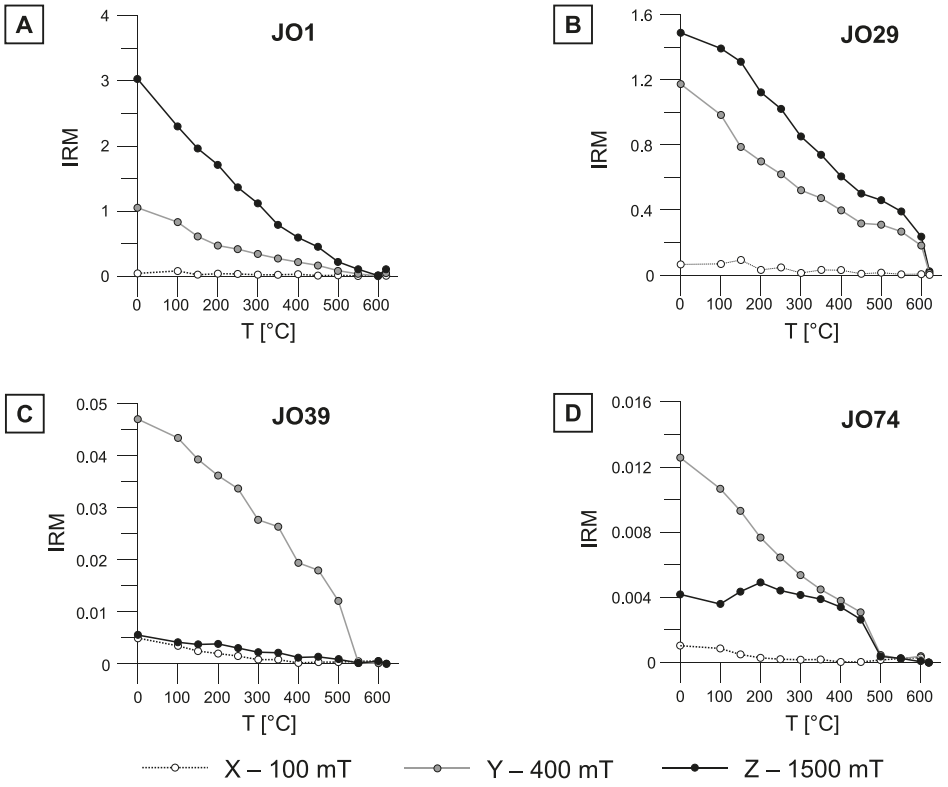

Fig. 44. Przykładowe wyniki testu Lowriego

Examples of Lowrie's test results

ników. Jedyną próbką w górnym odcinku profilu wyraźnie wyróżniającą się pod względem mineralogicznym jest JO74. Charakteryzuje się niską wartością parametru S, a więc wysoką (zwłaszcza na tle sąsiadujących z nią utworów) koercją. Test Lowriego (fig. 44D) pokazuje, że za taki wynik może odpowiadać getyt. Na dość silnej składowej maksymalnej, a więc minerałów o wysokiej koercji, widoczne jest lokalne minimum w temperaturze 100°C (T_C getytu to 120°C), po którym następuje wzrost namagnesowania. Może to świadczyć o przechodzeniu getytu w hematyt. Analizowaną próbkę pobrano z poziomu, nad którym rozpoczyna się odcinek brekcji wapiennych tkwiących w szarozielonym marglu (Modliński, Szymański, 2001). Obecność brekcji może wskazywać na lokalne wypłycenie zbiornika sedymentacji, czego potwierdzeniem jest niski poziom morza (fig. 42F).

Paleomagnetyzm

Zmienność litologii (składu mineralogicznego) znajduje odbicie w jakości uzyskanych wyników badań paleomagnetycznych. Spośród wszystkich paleoinklinacji (szare punkty na figurze 42G) wybrano te, które należy uznać za najbardziej wiarygodne (czarne punkty na figurze 42G). Jak widać są to głównie kierunki z dolnej, „hematytowej" części profilu.

Ze względu na bardzo słaby sygnał magnetyczny (INRM < $9 \cdot 10^{-4}$ A/m) analiza paleomagnetyczna w górnym odcinku profilu jest trudna – wyznaczane kierunki były w większości niestabilne, a niekiedy dla dwóch próbek pochodzących z jednego poziomu uzyskano wyniki wręcz przeciwstawne, przy czym żaden nie jest bardziej precyzyjny. Przeważająca część paleoinklinacji tej części profilu mieści się w przedziale 60–80°, podczas gdy według dostępnych obecnie rekonstrukcji pozycji płyty bałtyckiej we wczesnym paleozoiku (np. Torsvik i in., 1996) powinny być rzędu 60° w dolnej partii profilu (arenig–wczesny karadok), a wypłycać się do ok. 35° w stropowej części ordowiku. Biorąc pod uwagę wyniki opisywanych wcześniej badań petromagnetycznych można przypuszczać, że uzyskane kierunki nie są kierunkami pierwotnego namagnesowania, a raczej efektem procesów diagenezy. Za pierwotne kierunki można natomiast uznać inklinacje uzyskane dla dolnego odcinka profilu. Inklinacje są tu wyraźnie płytsze (rzędu 30–60°) i korespondują z oczekiwanymi. W odcinku tym obserwuje się kilka zmian polarności.

Podczas ordowiku Baltika znajdowała się na południowej półkuli. Dlatego też ujemne inklinacje należy interpretować jako polarność normalną. Przy konstrukcji diagramu zmian polarności magnetycznej (fig. 44) nie uwzględniano kierunków charakterystycznych o znacznie niższych inklinacjach od oczekiwanych.

WNIOSKI

1. Większość próbek ordowickiej części profilu otworu Jezioro Okrągłe IG 1 zawiera mierzalną pozostałość magnetyczną. Analizy termiczne wykazały, że w próbkach reprezentujących aszgil i karadok dominującym nośnikiem pozostałości magnetycznej jest magnetyt.
2. Dominacja hematytu, widoczna także na krzywych parametrów S i ARM/SIRM, zaznacza się w próbkach skał starszych od górnego landeilu.
3. MS oscyluje w ramach relatywnie niskich wartości ($0–80 \cdot 10^{-6}$ SI) praktycznie w obrębie całej sekwencji ordowickiej. Jej znaczny wzrost do $170 \cdot 10^{-6}$ SI można zaobserwować jedynie w stropowej, sylurskiej części profilu. W dolnej części profilu (poniżej dolnego karadoku) można zauważyć korelację pomiędzy krzywą eustatyczną a krzywą MS.
4. Tylko dolna część profilu, starsza od karadoku, przejawia obecność pierwotnego sygnału magnetycznego, który może być wykorzystany w badaniach magnetostratygraficznych.