WYNIKI BADAŃ MATERII ORGANICZNEJ, HISTORII POGRĄŻANIA I EWOLUCJI TERMICZNEJ

Marcin JANAS, Ewelina KRZYŻAK

BADANIA GEOCHEMICZNE MATERII ORGANICZNEJ ORDOWIKU I SYLURU METODĄ ROCK-EVAL

Badania materii organicznej syluru i ordowiku w rejonie otworów wiertniczych Jezioro Okrągłe IG 1 oraz Jezioro Okrągłe IG 2 mają swoje uzasadnienie, ponieważ w wapieniach (strukturach rafowych?) syluru i ordowiku we wschodniej części obwodu kaliningradzkiego oraz na terenie Litwy i Łotwy stwierdzono występowanie objawów złóż węglowodorów (VGD, 2010; Lukianowa i in., 2011), a lokalizacja potencjalnych poziomów macierzystych w profilu skał dolnego paleozoiku wschodniej części basenu bałtyckiego pozostaje zagadnieniem niezwykle ciekawym z punktu widzenia geologii naftowej.

W rozdziale przedstawiono interpretację 16 nowych wyników analiz Rock-Eval, wykonanych na fragmentach rdzeni wiertniczych z otworów wiertniczych Jezioro Okrągłe IG 1 oraz Jezioro Okrągłe IG 2.

Analiza pirolityczna Rock-Eval jest najbardziej rozpowszechnioną, wstępną, geochemiczną metodą badania potencjalnych skał macierzystych dla węglowodorów. Pozwala ona na określenie m.in. potencjału węglowodorowego, typu kerogenu zawartego w skałach oraz dojrzałości termicznej materii organicznej. Metoda została opracowana w latach 70. XX w. we Francuskim Instytucie Naftowym – IFP. Zarys metodyki badań został przedstawiony w pracach polskich i zagranicznych autorów (np. Espitalié i in., 1977, 1985; Kotarba, Szafran, 1985; Wilczek, Merta, 1992; Lafargue i in., 1998; Behar i in., 2001; McCarthy i in., 2011).

Analizy aparatem Rock-Eval 6 wykonano w laboratorium Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego na potrzeby przygotowania tego rozdziału. Przed wykonaniem analiz próbki zostały przemyte wodą, wysuszone, a następnie skruszone do odpowiedniej frakcji (<0,2 mm). Waga każdej przebadanej próbki wynosiła od 40 do 60 mg.

Parametry i wskaźniki otrzymane przy użyciu metody Rock-Eval 6 podsumowano w tabelach 20 i 21.

Tabela 20

Parametry i wskaźniki dostarczane w wyniku analizy Rock-Eval 6

Parameters and indicators delivered by Rock-Eval 6 analysis

Mierzone parametry Measured parameters	Jednostka Unit	Nazwa Name
S1	mgHC/g skały	wolne węglowodory
S2	mgHC/g skały	rezydualny potencjał generacyjny
S3	mgCO_2/g skały	CO_2 powiązany z materią organiczną
T_{max}	°C	T_{max} – temperatura maksymalnego generowania węglowodorów
HI	mg HC/g TOC	wskaźnik wodorowy
OI	mg CO_2/g TOC	wskaźnik tlenowy
PI	–	wskaźnik generowania
TOC	% wag.	całkowita zawartość węgla organicznego
RC	% wag.	węgiel organiczny rezydualny
PC	% wag.	węgiel organiczny podatny na proces pirolizy
MinC	% wag.	węgiel mineralny

Tabela 21

Wskaźniki obliczone na podstawie parametrów pomierzonych podczas analizy pirolitycznej Rock-Eval 6

Indicators based on parameters measured during Rock-Eval 6 analysis

Obliczone wskaźniki Calculated indicators	Jednostka Unit	Wzór Formula	Nazwa parametru Parameter name
T_{max}	°C	TpS2 – ΔT_{max}	temperatura maksymalnego generowania węglowodorów
PI	–	S1/(S1 + S2)	wskaźnik generowania
PC	% wag.	(S1+S2) · 0,083 + (S3 · 12/440) + (S3CO+1/2 · S3'CO) · 12/280	węgiel organiczny podatny na proces pirolizy
RC CO	% wag.	(S4CO · 12/280)	węgiel organiczny rezydualny (CO)
RC CO2	% wag.	($S4CO_2$ · 12/440)	węgiel organiczny rezydualny (CO_2)
RC	% wag.	RC CO + RC CO2	węgiel organiczny rezydualny
TOC	% wag.	PC + RC	całkowita zawartość węgla organicznego
HI	mg HC/g TOC	(S2 · 100)/TOC	wskaźnik wodorowy
OI	mg CO_2/g TOC	(S3 · 100)/TOC	wskaźnik tlenowy
OI CO	mg CO/g TOC	(S3CO · 100)/TOC	indeks tlenowy (CO)
pyroMinC	% wag.	(S3' · 12/440)+(S3'CO/2) · (12/280)	zawartość węgla mineralnego pirolitycznego
oxiMinC	% wag.	(S5 · 12/440)	zawartość węgla mineralnego oksydacyjnego
MinC	% wag.	pyroMinC + oxiMinC	węgiel mineralny

INTERPRETACJA WYNIKÓW

Interpretacja wyników objęła próbę określenia potencjału węglowodorowego, typu oraz dojrzałości termicznej kerogenu skał ordowiku i syluru.

Potencjał węglowodorowy. Wskaźnik TOC jest jednym z podstawowych wskaźników określających jakość skały macierzystej. Uznaje się, że skała macierzysta zdolna do generowania węglowodorów o znaczeniu ekonomicznym musi zawierać co najmniej 0,5% wag. węgla organicznego (Peters, Cassa, 1994). Warunek wysokiej wartości TOC nie jest wystarczający do wytypowania efektywnej skały macierzystej. Ważne jest, żeby wysoka zawartość TOC korelowała się z wysoką wartością parametru S2 (tab. 20), określającego potencjał generacyjny, oraz wskaźnika HI, stanowiącego pośredni wyznacznik ilości wodoru związanego z materią organiczną (Dembicki, 2009). Ograniczeniem stosowania tej klasyfikacji może być zaawansowany stopień przeobrażenia termicznego materii organicznej, zaniżający wyniki TOC, S2 oraz HI. Ma to miejsce, gdy znaczna część węglowodorów została już wygenerowana i powoduje, że wartości parametrów są niższe niż przed przeobrażeniem (Dembicki, 2017).

Typ kerogenu. Kerogen jest określany mianem prekursora węglowodorów i jest ściślej definiowany jako ta część materii organicznej rozproszonej w skałach osadowych, która nie rozpuszcza się w powszechnie używanych rozpuszczalnikach organicznych (Durand, 1980). Ze względu na odmienny rodzaj organicznego materiału źródłowego oraz jego środowiska depozycji, wyróżnia się cztery typy kerogenu: ropotwórczy kerogen typu I, ropo- i gazotwórczy kerogen typu II, gazotwórczy kerogen typu III oraz inertny kerogen typu IV.

Najpraktyczniejszą metodą rozróżnienia typu kerogenu zawartego w skałach macierzystych jest interpretacja wskaźników wodorowych (HI) i tlenowych (OI) wraz z temperaturą maksymalnego generowania węglowodorów (T_{max}) na diagramach klasyfikacyjnych HI/OI oraz HI/T_{max} (Espitalié i in., 1985).

Dojrzałość termiczna. Temperatura T_{max} jest wskaźnikiem wyrażającym stopień dojrzałości materii organicznej (fig. 33). Jest to temperatura, w której dochodzi do maksymalnego generowania węglowodorów w wyniku krakingu (termicznego rozkładu w trakcie pirolizy) kerogenu.

INTERPRETACJA WYNIKÓW DLA UTWORÓW ORDOWIKU I SYLURU

Profil ordowiku – niższego i wyższego katu (karadok i aszgil niższy) – jest reprezentowany przez osiem próbek wapieni i iłowców z interwału głęb. 870,4–909,5 m z otworu Jezioro Okrągłe IG 1 (tab. 22). Próbki te charakteryzują się niską zawartością węgla organicznego (TOC, mediana 0,36% wag.), niskim potencjałem generacyjnym (S2, mediana 0,5 mg HC/g skały) oraz znikomą zawartością tzw. wolnych węglowodorów (S1, mediana 0,22 mg HC/g skały). Materia organiczna ordowiku nie jest dojrzała termicznie, na co wskazują niskie wartości temperatury T_{max} (417–430°C,

mediana 427°C). Typ kerogenu nie jest możliwy do zinterpretowania na podstawie wskaźników wodorowych (HI) i tlenowych (OI) (fig. 34, 35). Wskaźniki te sugerują występowanie w ordowiku kerogenu typu III i IV, co nie jest możliwe, gdyż nie występowały wtedy rośliny lądowe, będące prekursorami tego typu kerogenu. Wartości HI i OI nie są więc wiarygodne, najprawdopodobniej ze względu na niskie wartości wskaźnika TOC i niski potencjał generacyjny (S2), a kerogen rozproszony w skałach jest zapewne typu II (Więcław i in., 2010). Zbadane skały ordowiku cechują się niskim potencjałem węglowodorowym i nie stanowią potencjalnych skał macierzystych.

Profil syluru jest reprezentowany przez pięć próbek iłowców i wapieni landoweru z interwału głęb. 839,5–846,1 m otworu Jezioro Okrągłe IG 1 oraz trzy próbki iłowców tego samego wieku z interwału głęb. 839,5–851,5 m otworu Jezioro Okrągłe IG 2 (tab. 22). Próbki syluru w obu otworach cechują się wartościami TOC na poziomie 0,26% wag. (mediana), wartościami potencjału generacyjnego (S2) na poziomie 0,47 mg HC/g skały (mediana) oraz zawartością tzw. wolnych węglowodorów na poziomie 0,21 mg HC/g skały (mediana) (tab. 22). Wartości T_{max} (420–432°C, mediana 426°C) świadczą o tym, że materia organiczna syluru jest niedojrzała i nie weszła jeszcze w fazę generowania węglowodorów. Przebadane skały nie wykazują więc potencjału węglowodorowego i nie stanowią potencjalnych skał macierzystych, z wyjątkiem dwóch próbek iłowców z głęb. 840,5 m (otwór Jezioro Okrągłe IG 1) oraz ok. 850 m (otwór Jezioro Okrągłe IG 2), które cechują się bardzo wysokim potencjałem węglowodorowym – są podobne do iłowców bitumicznych z Jantaru (landower) zachodniej i środkowej części basenu bałtyckiego. Te dwie omawiane próbki reprezentują wkładki prawie centymetrowej miąższości skał bogatych w węgiel organiczny (TOC odpowiednio = 5,42 i 3,82% wag.), o bardzo wysokim potencjale generacyjnym (S2 odpowiednio = 19,74 i 12,97 mg HC/g skały) (tab. 22; fig. 36). Analogiczne skały ilaste stwierdzono także w najniższych poziomach warstw pasłęckich dolnych (*sensu* Tomczyk, 1974) w otworach Bartoszyce IG 1 (1800,0 m) i Gołdap IG 1 (1418,3 m; Langier-Kuźniarowa, 1974). Podobnie, jak w przypadku opisanych wyżej skał ordowiku, wartości wskaźników HI i OI próbek skał syluru nie są wiarygodne i nie pozwalają na poprawną interpretację typu kerogenu, oprócz dwóch wyróżnionych próbek, które wykazują cechy macierzyste. Wartości wskaźników HI i OI tych dwóch próbek na diagramach korelacyjnych wyraźnie wskazują na kerogen typu II (fig. 34, 35).

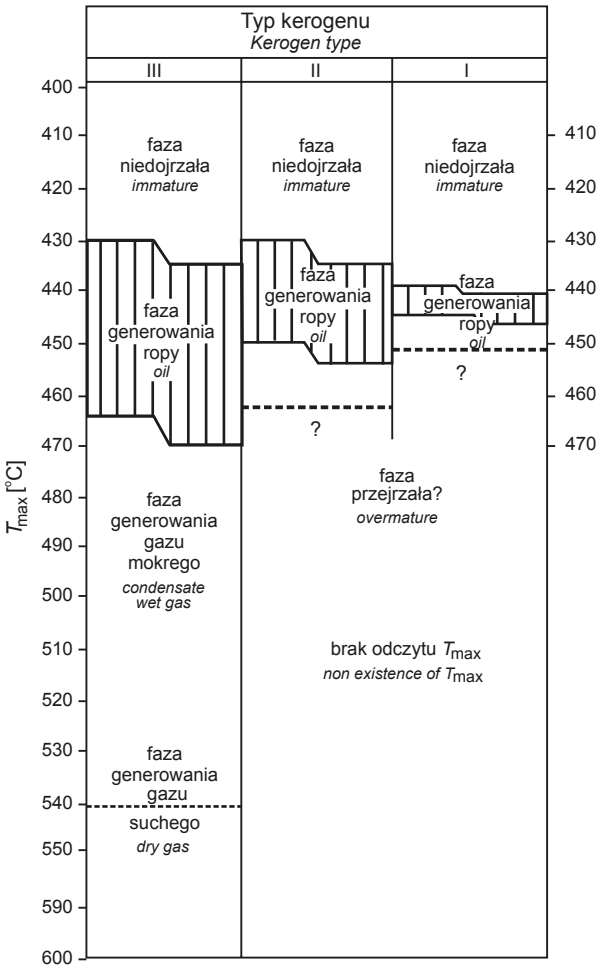


Fig. 33. Zastosowanie wskaźnika T_{max} w celu wytypowania głównych stref generowania ropy i gazu wg Espitaliégo (1986)

Use of T_{max} to determine the principal zones of oil and gas formation after Espitalié (1986)

WNIOSKI

W rozdziale przedstawiono interpretację nowych wyników analiz Rock-Eval, wykonanych na fragmentach rdzeni wiertniczych ordowiku i syluru otworów Jezioro Okrągłe IG 1 oraz Jezioro Okrągłe IG 2. Przebadane wapienie i iłowce nie wykazują w większości cech skał macierzystych, prócz dwóch cienkich (rzędu centymetrów) wkładek iłowców o bardzo wysokim potencjale węglowodorowym, najprawdopodobniej reprezentujących warstwy pasłęckie dolne (*sensu* Tomczyk, 1974). Materia organiczna ordowiku i syluru występuje najpewniej pod postacią kerogenu typu II (Więcław i in., 2010) i nie jest dojrzała termicznie. Stwierdzone w profilach syluru (landoweru) cienkie wkładki macierzyste mogą być odpowiednikami wiekowymi skał macierzystych formacji Dobele, występujących na terenie obwodu kaliningradzkiego, Litwy i Łotwy (VGD, 2010; Zdanaviciute, Lazauskiene, 2007).

Tabela 22

Zestawienie wartości parametrów i wskaźników Rock-Eval 6 ordowiku i syluru

List of the Rock-Eval 6 parameters and indicators of Ordovician and Silurian rocks

Stratygrafia Stratigraphy		Litologia Lithology	Głęb. [m] Depth	S1	S2	S3	T_{max}	HI	OI	PI	TOC	RC	PC	MinC
				[mgHC/g skały] [mgHC/g rock]		[$mgCO_2$/g skały] [$mgCO_2$/g rock]	[°C]	[mgHC/g TOC]	[$mgCO_2$/g TOC]	[mgHC/g skały] [mgHC/g rock]	[% wag] [wt. %]			[%]
Jezioro Okrągłe IG 1														
Sylur	landower	iłowiec	839,5	0,22	0,55	0,61	426	215	238	0,29	0,25	0,17	0,09	1,58
			840,5	1,50	19,74	2,80	420	364	52	0,07	5,42	3,53	1,90	0,44
			841,3	0,21	0,47	0,50	427	198	212	0,32	0,24	0,16	0,08	1,49
		wapień	844,0	0,17	0,37	0,73	429	143	285	0,32	0,26	0,18	0,08	2,31
			846,1	0,15	0,43	0,92	428	144	306	0,26	0,30	0,22	0,08	2,96
Ordowik	wyższy kat (niższy aszgil)	wapień	870,4	0,18	0,44	0,85	417	80	154	0,29	0,55	0,47	0,09	4,03
			873,5	0,24	0,38	0,64	430	121	205	0,39	0,31	0,23	0,08	3,98
	niższy kat (karadok)	wapień detrytyczny	885,0	0,15	0,42	0,77	430	210	385	0,27	0,20	0,12	0,08	2,18
			894,5	0,29	0,68	0,49	430	197	143	0,30	0,34	0,24	0,10	9,47
			898,0	0,18	0,43	0,90	427	117	247	0,30	0,37	0,28	0,09	5,01
			907,0	0,19	0,58	1,00	427	514	891	0,25	0,11	0,01	0,10	0,54
			907,1	0,24	0,56	1,11	425	143	284	0,30	0,39	0,28	0,11	3,91
			909,5	0,29	1,75	0,62	421	437	155	0,14	0,40	0,21	0,19	8,90
Jezioro Okrągłe IG 2														
Sylur	landower	iłowiec	839,5	0,25	0,61	0,70	424	134	153	0,29	0,46	0,36	0,10	1,42
			ok. 850	1,06	12,97	1,70	421	339	44	0,08	3,82	2,57	1,25	0,44
		iłowiec wapnisty	851,5	0,18	0,35	0,56	432	129	208	0,35	0,27	0,20	0,07	2,48

S1 – zawartość wolnych węglowodorów obecnych w próbce skalnej, uwolnionych w trakcie pirolizy w temperaturze 300°C / content of free hydrocarbons released during pyrolysis at 300°C

S2 – zawartość węglowodorów powstałych podczas pierwotnego krakingu kerogenu w temperaturze od 300 do 650°C / content of hydrocarbons released during primary cracking of kerogen at temperature between 300 and 650°C

S3 – zawartość CO_2 z destrukcji materii organicznej / CO_2 content released from organic matter

T_{max} – temperatura, w której występuje maksymalny kraking kerogenu S2 i następuje maksimum generowania węglowodorów / temperature of maximum release of hydrocarbons from cracking of kerogen during pyrolysis

HI – wskaźnik wodorowy liczony ze wzoru: (S2 · 100) / TOC / hydrogen index calculated from the formula as above

OI – wskaźnik tlenowy liczony ze wzoru: (S3 · 100) / TOC / oxygen index calculated from the formula as above

PI – wskaźnik produktywności liczony ze wzoru: S1 / (S1 + S2) / production index calculated from the formula as above

TOC – całkowita zawartość węgla organicznego liczona ze wzoru: PC + RC / total organic carbon content calculated from the formula as above

RC – zawartość węgla rezydualnego / residual carbon

PC – zawartość węgla pirolitycznego / pyrolizable carbon

MinC – całkowita zawartość węgla mineralnego / mineral carbon

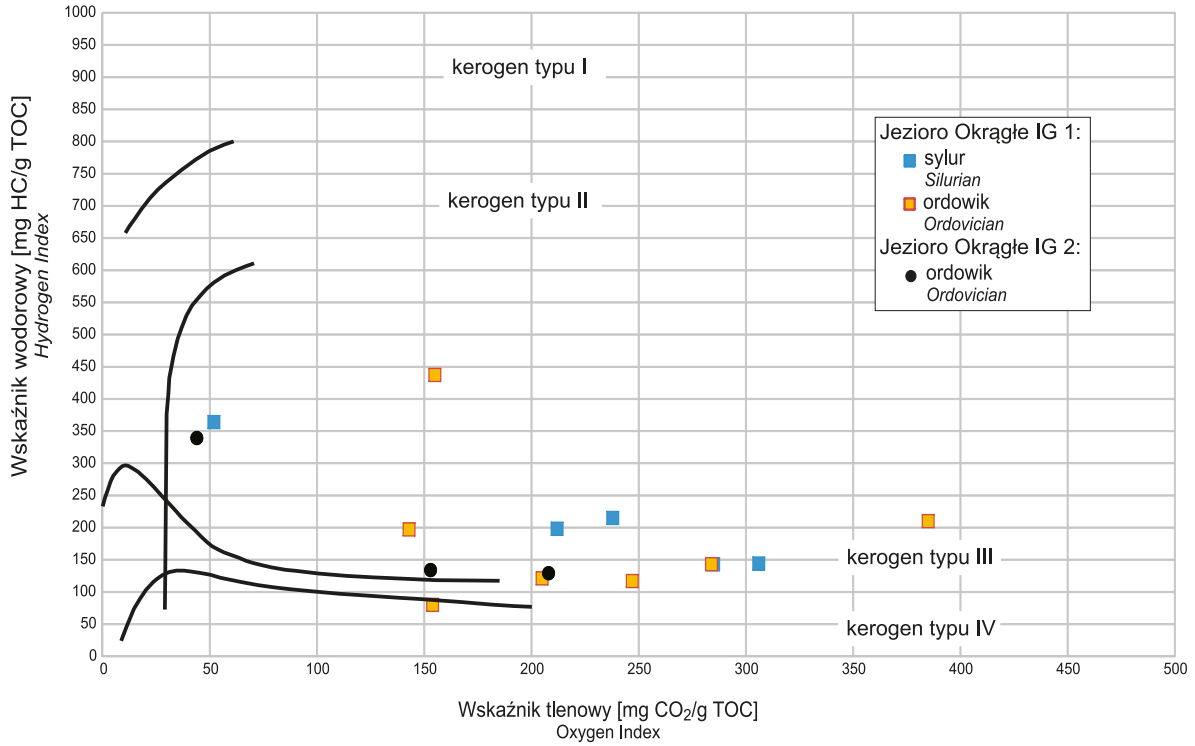


Fig. 34. Diagram zależności wskaźników HI/OI przedstawiający średnie wartości wszystkich interpretowanych wyników

Ścieżki przeobrażenia termicznego dla poszczególnych typów kerogenu wg Espitaliégo i in. (1985); HI – wskaźnik wodorowy, OI – wskaźnik tlenowy

HI/OI diagram showing the average results of all interpreted results

Maturity paths of individual kerogen types after Espitalié et al. (1985); HI – hydrogen index, OI – oxygen index

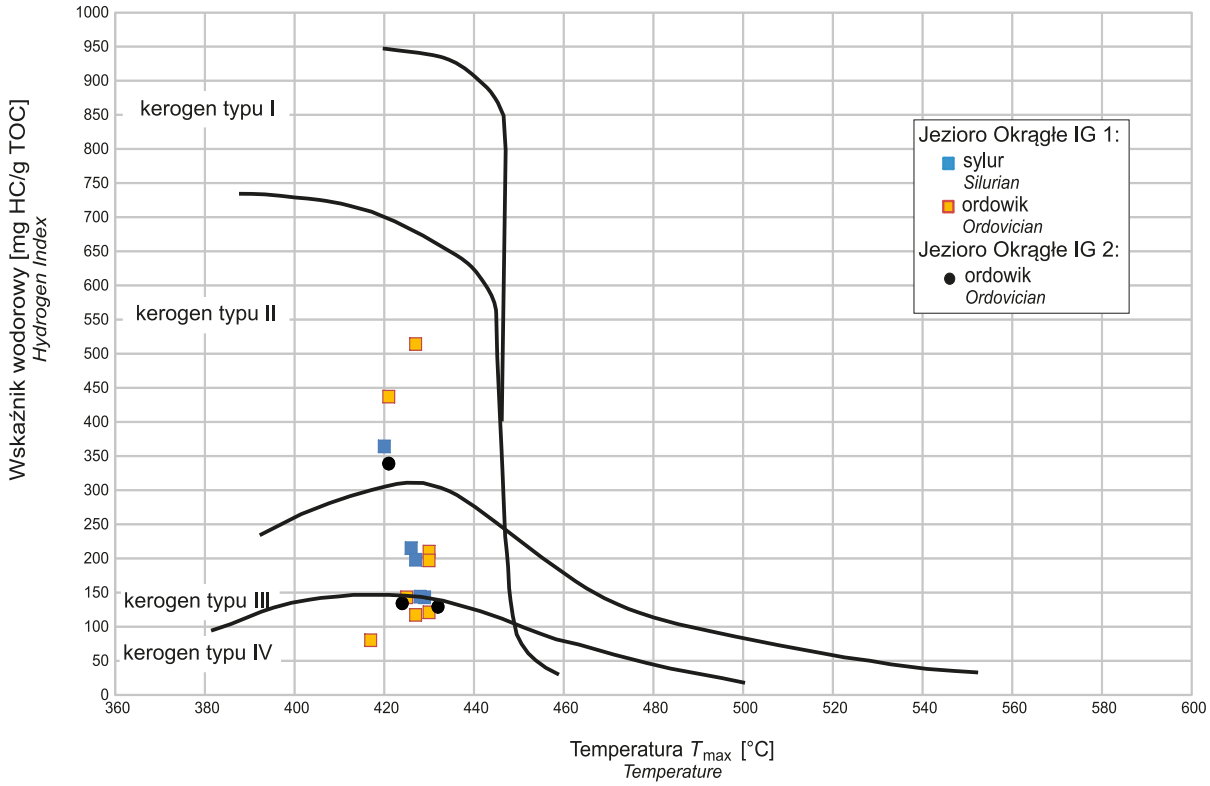


Fig. 35. Diagram zależności HI/T_{max} przedstawiający wyniki przebadanych próbek

HI/T_{max} diagram showing the results of analysed samples

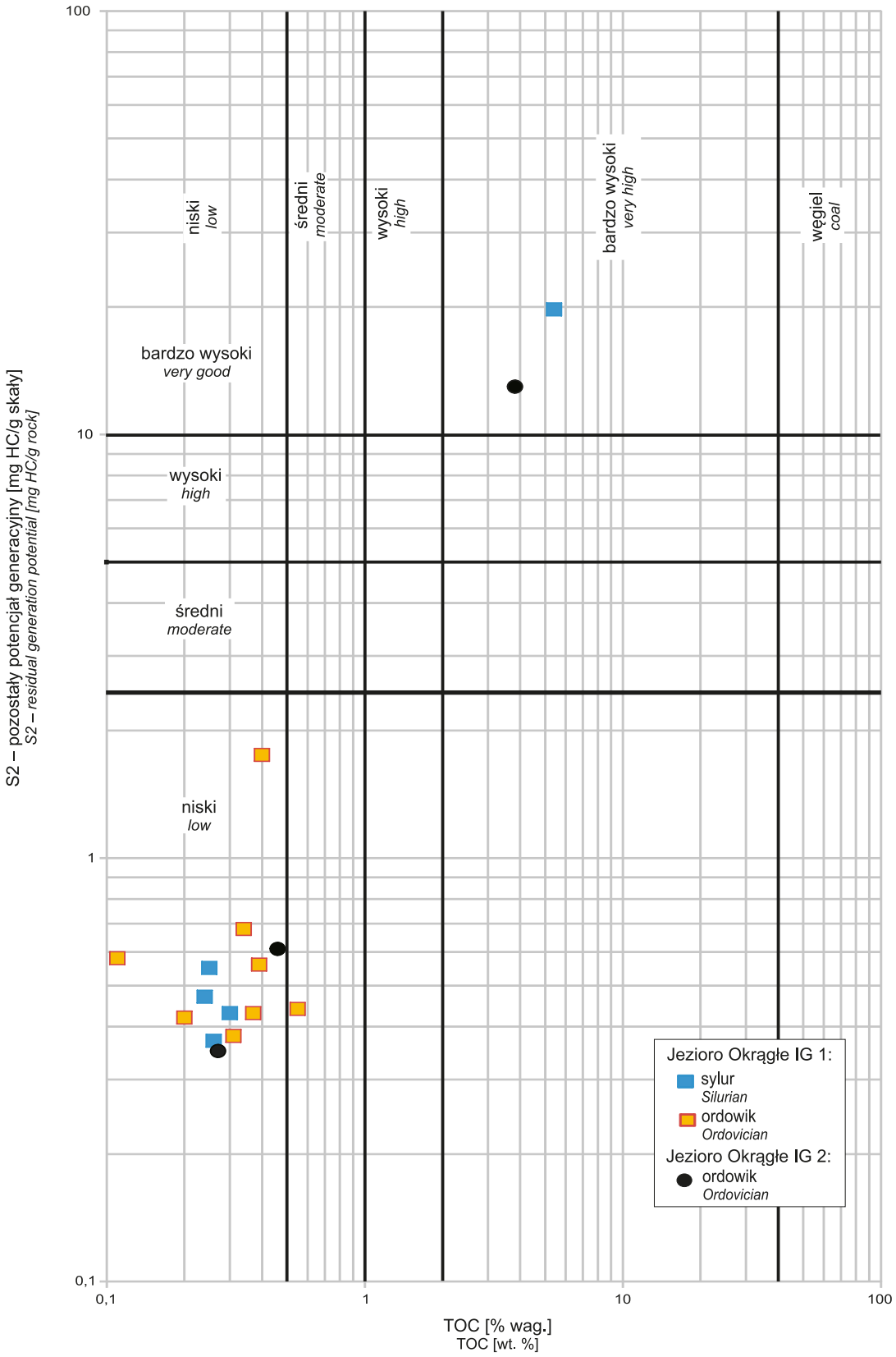


Fig. 36. Diagram zależności S2/TOC próbek w skali logarytmicznej

Linie klasyfikacyjne wg Dembickiego (2017)

S2/TOC diagram of analysed samples in logarithmic scale

Classification lines after Dembicki (2017)

Paweł KOSAKOWSKI

REKONSTRUKCJA HISTORII POGRĄŻANIA I EWOLUCJI TERMICZNEJ ORAZ ROZWÓJ DOJRZAŁOŚCI MATERII ORGANICZNEJ

METODY BADAŃ

Rekonstrukcję historii pogrążania utworów paleozoiku, mezozoiku i kenozoiku wyróżnionych w profilach otworów wiertniczych Jezioro Okrągłe IG 1 i Jezioro Okrągłe IG 2 oraz rekonstrukcję ewolucji termicznej basenu przeprowadzono za pomocą techniki jednowymiarowych modelowań z wykorzystaniem programu BasinMod® 1-D firmy Platte River.

W procedurze modelowań zrekonstruowano historię pogrążania profilu osadowego w obydwu otworach oraz ewolucję strumienia cieplnego. W historii pogrążania zdefiniowano miąższość, litologię i wiek stratygraficzny poszczególnych horyzontów wyróżnionych w profilach osadowych. W przypadkach, gdy nie dysponowano dokładnymi informacjami, szczególnie w zakresie litologii przewiercanych poziomów stratygraficznych, wykorzystywano dane uśrednione z sąsiednich otworów. Dla poszczególnych jednostek stratygraficznych w bibliotece programu tworzono nowe wydzielenia litologiczne przez przyjęcie proporcji między podstawowymi składnikami litologicznymi, a następnie wyliczano dla nich wartości parametrów petrofizycznych.

W modelu pogrążania uwzględniono poprawkę na dekompakcję z zastosowaniem algorytmu Sclatera i Christiego (1980). Miąższości zerodowanych części profilu rekonstruowano w procedurze modelowań dojrzałości termicznej, tj. szacowano je na podstawie ekstrapolacji trendu dojrzałości termicznej do wartości pomierzonych.

Modelowania dojrzałości prowadzono metodą *forward*, tj. zakładano stan wyjściowy i definiowano rodzaj procesu geologicznego, a następnie wyliczano jego skutek dla współczesnego rozkładu dojrzałości termicznej materii organicznej w profilu. W przypadku niezgodności między dojrzałością wyliczaną a pomierzoną procedurę powtarzano, zakładając inne parametry modelu, aż do osiągnięcia zadowalającej kalibracji modelu.

Dojrzałość termiczną wyliczano z zastosowaniem algorytmu Sweeneya i Burnhama (1990). Do kalibracji słuszności założeń w modelu termiczno-pogrążeniowym wykorzystano wyniki pomiarów temperatury T_{max} z analizy pirolitycznej Rock-Eval (Janas, Krzyżak, ten tom).

W rekonstrukcji historii termicznej uwzględniono współczesny reżim cieplny oraz zmiany średniej temperatury powierzchniowej w zależności od pozycji geograficznej analizowanego obszaru w czasie geologicznym (Wygrala, 1989; Yalcin i in., 1997).

Wszystkim wydzieleniom stratygraficznym przyporządkowano wieki liczbowe, stosując tabelę stratygraficzną Cohen i in. (2013).

WYNIKI MODELOWANIA

Profile otworów wiertniczych Jezioro Okrągłe IG 1 i Jezioro Okrągłe IG 2 charakteryzują się przede wszystkim znaczną niekompletnością stratygraficzną i względnie płytkim zaleganiem podłoża prekambryjskiego.

Rekonstrukcję warunków pogrzebania oraz historii termicznej wykonano z zastosowaniem techniki jednowymiarowych modelowań numerycznych. W powyższej rekonstrukcji ewolucji geologicznej wykorzystano wcześniejsze publikacje, głównie o charakterze regionalnym, w szczególności prace: Stolarczyka (1979), Dadleza (1993), Modlińskiego i in. (1999), Harffa i in. (2011), Botora (2016), natomiast w zakresie ewolucji termicznej posłużono się m.in. artykułami: Daradicha i in. (2002), Poprawy i Grotek (2005) oraz Szewczyka i Gientki (2009).

KALIBRACJA MODELU

Kalibrację modeli termiczno-pogrążeniowych, pomimo że omawiane obydwa otwory są zlokalizowane w niewielkiej odległości od siebie, wykonano oddzielnie dla każdego z nich. Wykorzystano 13 wyników pomiarów temperatury T_{max} z analizy pirolitycznej Rock-Eval wykonanych w otworze wiertniczym Jezioro Okrągłe IG 1 w utworach ordowiku i syluru (fig. 37) oraz trzy wyniki T_{max} z syluru z otworu Jezioro Okrągłe IG 2 (Janas, Krzyżak, ten tom). Ze względu na znaczną niekompletność profili stratygraficznych oraz bardzo słabą reprezentatywność danych kalibracyjnych, modele przyjęte do rekonstrukcji rozwoju pogrążania i ewolucji termicznej nie są unikalne, tzn. są możliwe inne warianty rozwoju depozycji i ewolucji termicznej.

W kalibracji modeli gęstość współczesnego strumienia cieplnego została przyjęta za Szewczykiem i Gientką (2009) na poziomie 45 mW/m^2. W procedurze kalibracji modele testowano przy założeniu stałej wielkości strumienia cieplnego, równej współczesnemu strumieniowi, w całym przedziale czasowym od kambru do czwartorzędu.

Ze względu na obecność znaczących luk stratygraficznych, obejmujących zarówno przedział stratygraficzny paleozoiku, jak i mezozoiku, testowano kilka wariantów

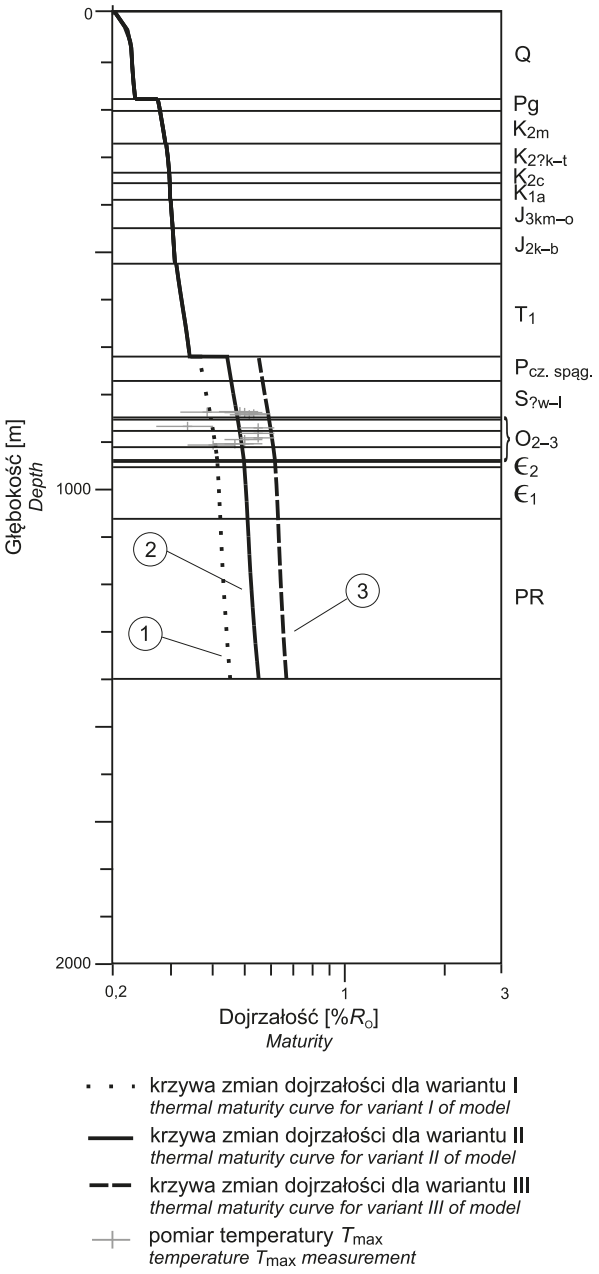


Fig. 37. Kalibracja modelu historii termicznej z pomiarami dojrzałości termicznej w otworze Jezioro Okrągłe IG 1, w alternatywnych wariantach modelu erozji

Q – czwartorzęd, Pg – paleogen, K_{2m} – mastrycht, $K_{2?k-t}$ – ?koniak dolny–turon, K_{2c} – cenoman, K_{1a} – alb, J_{3km-o} – kimeryd i oksford, J_{2k-b} – kelowej i baton, T_1 – trias dolny, $P_{cz.spąg.}$ – czerwony spągowiec, $S_{?w-l}$ – ?wenlok–landower, O_{2-3} – ordowik środkowy i górny, $Є_2$ – kambr środkowy, $Є_1$ – kambr dolny, PR – proterozoik

Calibration of the thermal history model with measurements of thermal maturity for alternative variants of erosion models in the Jezioro Okrągłe IG 1 borehole

Q – Quaternary, Pg – Paleogene, K_{2m} – Maastrichtian, $K_{2?k-t}$ – ?Lower Coniacian–Turonian, K_{2c} – Cenomanian, K_{1a} – Albian, J_{3km-o} – Kimmeridgian and Oxsfordian, J_{2k-b} – Callovian and Bathonian, T_1 – Lower Triassic, $P_{cz.spąg.}$ – Rotliegendes, $S_{?w-l}$ – ?Wenlock–Llandovery, O_{2-3} – Middle–Upper Ordovician, $Є_2$ – Middle Cambrian, $Є_1$ – Lower Cambrian, PR – Proterozoic

miąższości pierwotnych dla usuniętych erozyjnie osadów. Założono przy tym późnokaledońskie ruchy wypiętrzające, kończące etap depozycji wczesnopaleozoicznej i erozję znacznej części osadów syluru oraz wypiętrzające ruchy waryscyjskie, w wyniku których zostały usunięte osady dewonu i karbonu, a także ruchy alpejskie redukujące różne ogniwa utworów mezozoiku. Ze względu na bliskość obu otworów, w procedurze kalibracji sumaryczną wielkość erozji kaledońskiej oszacowano na tym samym poziomie 500 m, a erozję poszczególnych poziomów mezozoiku na poziomie kilkudziesięciu metrów. W procedurze kalibracji wykazano, że największą wrażliwość modele wykazują na erozję waryscyjską. Jej wielkość, głównie erozję utworów dewonu, ustalono na podstawie map paleomiąższości zestawionych w pracy Modlińskiego i in. (1999, 2010) oraz wyników dopasowania przebiegu dojrzałości modelowanej do pomierzonych parametrów dojrzałości w utworach starszego paleozoiku i predykcji dojrzałości w utworach mezozoiku.

Testowano modele w trzech wariantach wielkości erozji późnokarbońskiej: 500, 1000 i 1500 m (odpowiednio krzywe 1, 2 i 3 na figurze 37). Najlepszy stopień dopasowania do krzywej zmian dojrzałości z modelu pomierzonych wartości dojrzałości uzyskano przy założeniu wielkości erozji utworów dewońskich na poziomie 1000 m, przy przyjętej wielkości erozji utworów karbońskich na poziomie 100 m (krzywa 2, fig. 37).

Powyższe wielkości erozji waryscyjskiej przyjęto w modelu, pomimo że przekraczają paleomiąższości na analizowanym obszarze sugerowane w pracy Modlińskiego i in. (1999). Takie miąższości są notowane np. w zachodniej części Litwy, w rejonie Kłajpedy (Šliaupa, Hoth, 2011). Wskazuje to, że model został zrealizowany w realnych przedziałach miąższościowych.

ANALIZA SUBSYDENCJI I TEMPA DEPOZYCJI

Profile otworów wiertniczych Jezioro Okrągłe IG 1 i Jezioro Okrągłe IG 2 są mocno niekompletne. Najstarszymi, nawierconymi w podłożu krystalicznym utworami są mezoproterozoiczne skały magmowe z zalegającymi na nich kambryjskimi piaskowcami. W analizie subsydencji i tempa depozycji skały krystalicznego podłoża platformy wschodnioeuropejskiej zostały pominięte, co spowodowało, że model rozpoczynają utwory paleozoiczne – kambru dolnego i środkowego, nawiercone na głęb. 945,0 m w otworze Jezioro Okrągłe IG 1 oraz na głęb. 968,0 m w Jeziorze Okrągłym IG 2 (fig. 38). Na nich bezpośrednio zalegają węglany ordowiku i dolnego syluru. Jest to okres przejścia sedymentacji w warunkach pasywnej krawędzi kontynentu (późny ediakar–wczesny kambr) do depozycji w warunkach basenu przedgórskiego, tworzącego się w wyniku fleksuralnego ugięcia krawędzi Baltiki (Poprawa i in., 1999, 2006). Etap ten charakteryzował się systematycznym wzrostem tempa subsydencji tektonicznej, której maksimum miało miejsce w sylurze (fig. 38).

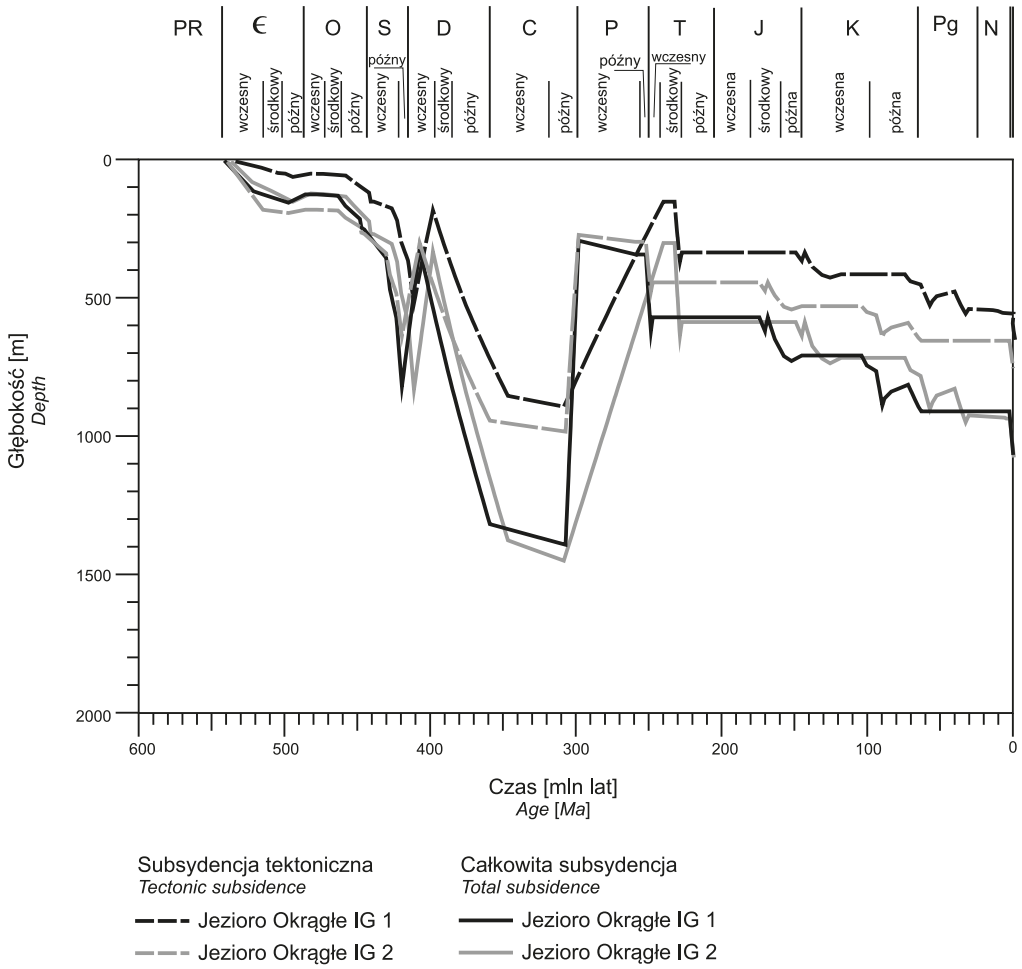


Fig. 38. Krzywa pogrzebania dla utworów kambru dolnego i subsydencji tektonicznej dla profilów osadowych otworów wiertniczych Jezioro Okrągłe IG 1 i Jezioro Okrągłe IG 2

Burial history of the Lower Cambrian sediments and tectonic subsidence for the sedimentary section of Jezioro Okrągłe IG 1 and Jezioro Okrągłe IG 2 boreholes

Subsydencja w tym przedziale czasowym, szczególnie w sylurze, była kompensowana przez akumulację osadów górnego syluru, a basen został całkowicie wypełniony wczesnodewońskimi osadami old redu (Šliaupa, Hoth, 2011). Tempo depozycji w przedziale czasowym ordowiku było niskie, poniżej 10 m/mln lat, ale w sylurze wzrosło do ponad 30 m/mln lat (fig. 39). Po krótkim epizodzie erozyjnym we wczesnym dewonie, w wyniku którego została usunięta część utworów syluru (fig. 38), rozpoczęła się depozycja miąższych utworów dewonu i karbonu. Zostały one jednak usunięte podczas wypiętrzenia i erozji późnokarbońskiej. Stąd bezpośrednio na utworach ordowiku górnego i syluru zalegają utwory permu i triasu dolnego, a na nich ?jura dolna i wyższa część jury środkowej (baton–kelowej) oraz niższa jury górnej (oksford). Profil mezozoiku zamykają utwory kredy (alb górny–mastrycht). Tempo depozycji utworów mezozoiku było w obu otworach względnie niskie i wynosiło 10–20 m/mln lat (alb górny–cenoman 20–35 m/mln lat) (fig. 39). Proces sedymentacji przerwała późnokredowo-wczesnopaleoceńska inwersja obszaru z erozją osadów kredy (fig. 38). Profil osadowy otworu Jezioro Okrągłe IG 1 i Jezioro Okrągłe IG 2 kończą utwory paleogenu i czwartorzędu.

HISTORIA POGRZEBANIA I EWOLUCJA TERMICZNA

Modele historii pogrążania osadów i ewolucji termicznej w otworach Jezioro Okrągłe IG 1 i Jezioro Okrągłe IG 2 odtworzono od początku kambru (fig. 40), pominięto etap przedkambryjski rozwoju basenu. Epizod depozycji kambryjskiej był krótki i zakończył się z końcem kambru środkowego, a głębokość pogrążenia spągu kambru dolnego (środkowego) na koniec tego okresu nieznacznie przekroczyła 150 m, przy paleotemperaturze poniżej 20°C (fig. 40).

Późny kambr i wczesny ordowik to okres wypiętrzenia i nieznacznych rozmiarów erozji. Kolejny okres pogrążania był związany z depozycją utworów ordowiku (od dapingu) i syluru. Przy uwzględnieniu oszacowanej w procedurze kalibracji wielkości erozji utworów syluru na 500 m, głębokość pogrążania na koniec tego epizodu depozycyjnego wyniosła ok. 850 m, a temperatura przekroczyła 50°C (fig. 40).

Wczesnodewońska erozja usunęła zdeponowane osady syluru. W wyższym wczesnym dewonie na omawiany obszar ponownie wkroczyło morze. Dewon w obu otworach nie jest reprezentowany, ale szacowana jego sumaryczna pierwotna miąższość mogła osiągać nawet 1100 m (Šliaupa, Hoth, 2011). W analizowanych otworach w modelach przyjęto wielkość zbliżoną do maksymalnej paleomiąższości oraz założono depozycje 100 m miąższości osadów najniższego karbonu. Przy powyższych warunkach głębokość pogrążenia spągu profilu osadowego (bez mezoproterozoiku) we wczesnym karbonie wynosiła 1400–1450 m, a temperatura przekroczyła 70°C (fig. 40). Pod koniec okresu rozwoju utworów paleozoicznych materia organiczna kambru osiągnęła dojrzałość w przedziale „okna ropnego" (fig. 41). Erozja późnokarbońska, w wyniku której usuniętych zostało ponad 1100 m osadów dewońsko-karbońskich, zatrzymała przyrost głębokości pogrążania i wzrost temperatur (fig. 40).

Etap permsko-mezozoiczny charakteryzował się ogólnie niewielką, lecz ciągłą, depozycją i sukcesywnym przyrostem głębokości pogrążania (fig. 40). Etap kenozoiczny to głównie okres niedepozycji. W obu tych etapach nie odtworzono zarówno głębokości pogrążenia spągu profilu osadowego, jak i temperatury wgłębnej, uzyskanej sprzed erozji późnokarbońskiej.

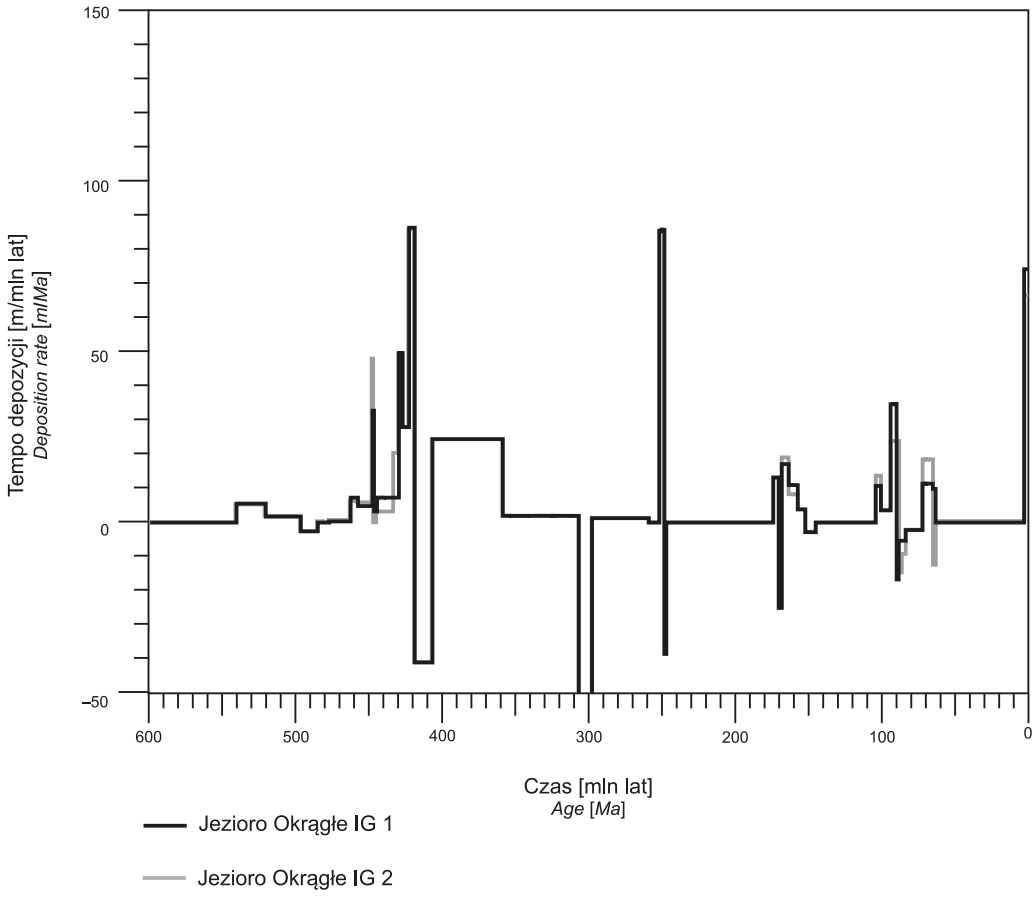


Fig. 39. Tempo depozycji osadów dla profilów otworów wiertniczych Jezioro Okrągłe IG 1 i Jezioro Okrągłe IG 2

Sediment deposition rate for the section of Jezioro Okrągłe IG 1 and Jezioro Okrągłe IG 2 boreholes

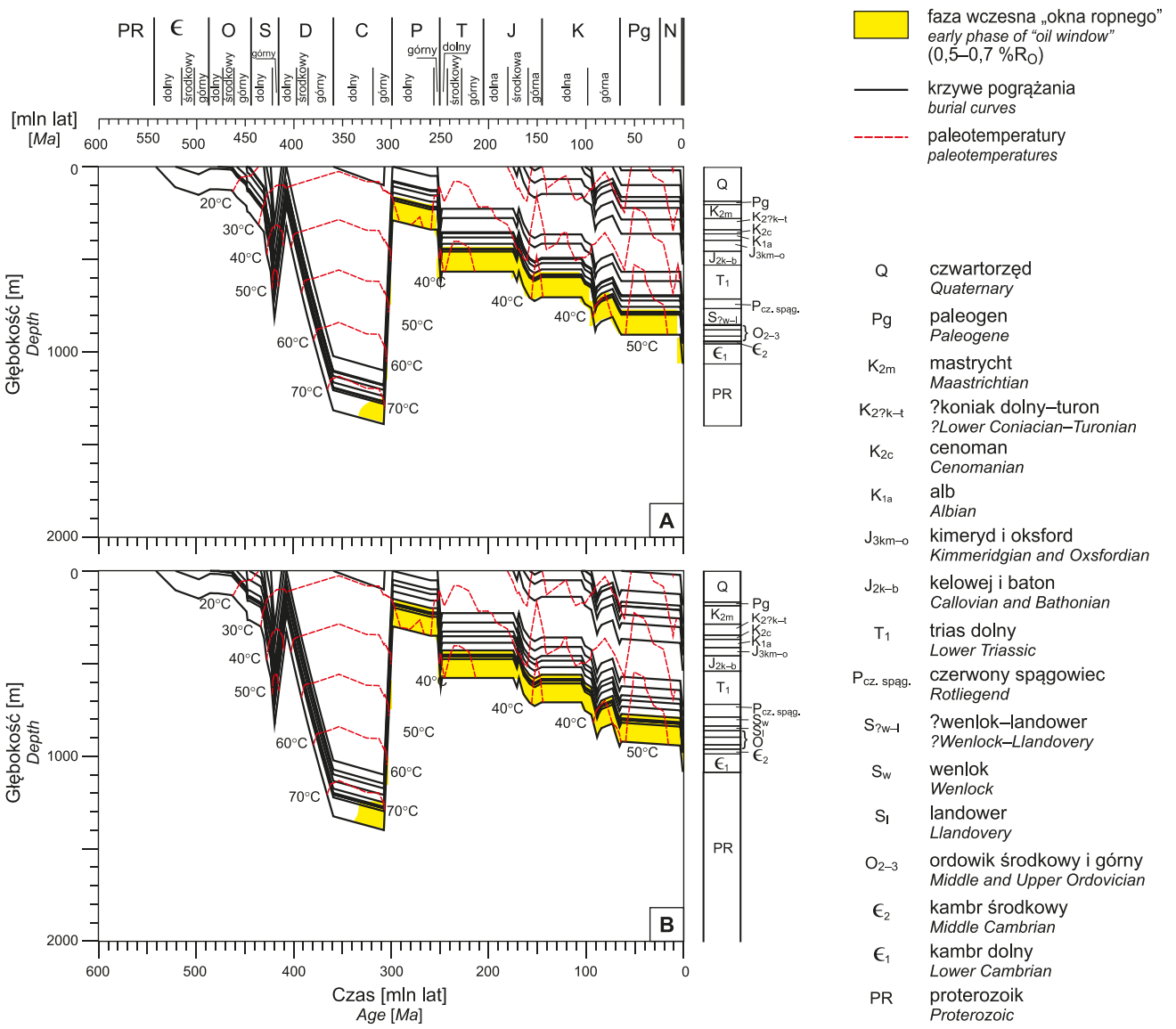


Fig. 40. Krzywe pogrążania wyróżnionych poziomów profilów osadowych (bez utworów mezoproterozoiku) otworów (A) Jezioro Okrągłe IG 1 i (B) Jezioro Okrągłe IG 2 z przedziałami dojrzałości termicznej

Burial history (without Mesoproterozoic section) and thermale volution plot of (**A**) Jezioro Okrągłe IG 1 and (**B**) Jezioro Okrągłe IG 2 boreholes, with thermal maturity zones

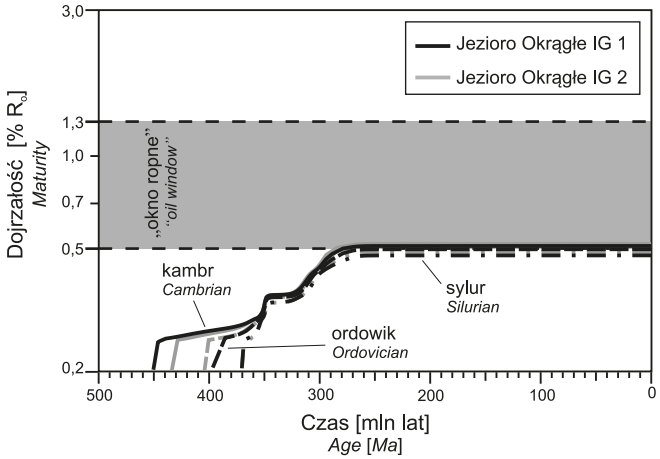


Fig. 41. Ewolucja dojrzałości termicznej kerogenu w poziomach stratygraficznych kambru, ordowiku i syluru w profilach otworów Jezioro Okrągłe IG 1 i Jezioro Okrągłe IG 2

Thermal evolution of organic matter in the Cambrian, Ordovician and Silurian horizons in section of Jezioro Okrągłe IG 1 and Jezioro Okrągłe IG 2 boreholes